

**Einflüsse der Waldstruktur auf die
Messparameter
voll polarimetrischer abbildender Radarsysteme**

Dissertation
zur
Erlangung der naturwissenschaftlichen Doktorwürde
(Dr. sc. nat.)
vorgelegt der
Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Universität Zürich
von
Lukas Daniel Zuberbühler
von
Herisau AR

Promotionskomitee

Prof. Dr. Michael Schaepman (Vorsitz)
Prof. Dr. Irena Hajnsek
Dr. Erich Meier (Leitung der Dissertation)
Dr. David Small

Zürich, 2014

Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Zürich

Dissertation

**Einflüsse der Waldstruktur auf die Messparameter voll polarimetrischer
abbildender Radarsysteme**

Autor:

Lukas Daniel Zuberbühler

Remote Sensing Laboratories

Geographisches Institut

Universität Zürich

Winterthurerstrasse 190

CH-8057 Zürich

Schweiz

<http://www.geo.uzh.ch/rsl>

März 2014

Summary

The focus of this thesis is the investigation of forests using fully polarimetric synthetic aperture radar (SAR). The main goal is to describe mechanisms and parameters that influence the measured backscatter. To that end, methods were developed that relate structural vegetation parameters to observables of a fully polarimetric SAR system. To evaluate the methods and to formulate and test hypotheses, an additional method was developed to realistically simulate SAR data. Preserving a physically correct formulation, simulated backscatter data of a complex, realistic tree model was generated that is directly comparable with *in natura* SAR observations. Differences between observed and modelled backscatter were shown to be caused by mechanisms that can be related to structural vegetation properties. This structural dependency was confirmed at multiple test sites and in simulated data. Consideration of vegetation parameters has the potential to increase the reliability of estimation of parameters such as biomass from SAR data.

Extended Summary

Synthetic Aperture Radar (SAR) systems are active remote sensing systems operating in the microwave frequency band ($f \approx 30 \text{ MHz} - 300 \text{ GHz}$, corresponding wavelength $\lambda \approx 10 \text{ m} - 0.001 \text{ m}$). As the imaging principle is active, observations can be carried out without natural illumination. This opens the opportunity for earth observation in tropical regions with persistently dense clouds, or during the polar night. Polarimetric SAR observations are based on the controllable polarisation state of the illuminating radiation and on the consequent possibility of analysing the polarisation state of the backscattered signal. The main goal of this thesis was to describe mechanisms and parameters that influence the measured backscatter and its polarisation state for boreal and temperate forests. The boreal forest type was investigated in Krycklan, Sweden, the temperate type in Hinwil, Switzerland. For a deeper understanding of these mechanisms, a method was developed to simulate SAR data. Building on existing backscatter modelling approaches, the proposed method preserves a physically correct formulation of the scattering problem and uses a realistic tree model of high complexity.

Longer wavelengths are known to penetrate well into the vegetation volume. The data basis for this investigation was therefore a set of P-band observations ($f \approx 350 \text{ MHz}$, $\lambda \approx 0.8 \text{ m}$). At this wavelength, the whole vegetation volume can contribute to the backscattered signal. Due to the high penetration, ground interactions were also likely (e.g. double bounce).

Early investigations of polarimetric SAR data showed a clear correlation between forest biomass and SAR backscatter. The highest correlation for a center frequency in the P-band was found between biomass and the cross-polar channel (HV). Newer investigations have proven the correlation between cross-polar backscatter and biomass. The ability to invert SAR backscatter into biomass highlights the potential of SAR systems to become an indispensable tool for the global monitoring of an important link in the global carbon cycle. However, the variety of past and present investigations also shows a high variability of the strength of the correlation between backscatter and biomass. Although different semi-empirical modelling approaches have therefore been proposed to invert backscatter into biomass, almost none of the parameter values found are generally applicable across different test sites. This lead to the investigation of why the parameters are in general not comparable between different test sites. A possible explanation for different correlations between backscatter and biomass is an ecological process: thinning that occurs during forest succession.

Due to increasing demands for resources (light, water, nutrients), a growing forest stand can support only a decreasing number of trees. In this thesis, algorithms to estimate the thinning based on forest inventory data were newly developed. A thinning could be verified in both test areas. In the boreal forest (test area Krycklan) the reduction of the number of trees per unit area, due to increasing tree biomass, was found to be higher than in the temperate forest (test area Hinwil). According to the Mie theory, the backscatter of a single tree was shown not to be directly coupled to the tree volume. Estimation of the coupling between single tree and backscatter was possible by using the newly developed SAR simulation as well as algorithms based on measured SAR data. As a main finding, the thinning process of a growing forest stand can explain the difference in correlation between biomass and backscatter. These two findings lead to the conclusion that the weaker correlation between SAR backscatter and biomass measured in the test area Krycklan was mainly caused by greater thinning.

The geometry of a single tree and the structure of the forest stand also affect the measured backscatter. It could be shown that longer crowns decrease the backscatter in the double bounce mechanism compared to single trees with equal biomass and shorter crowns, whereas a multi-layered forest responds with a weaker backscatter in the cross-polar channel than a comparable single-layered forest.

According to the Mie theory, a small change in scatterer dimension can lead to a large backscatter change. These Mie oscillations are dominant for scatterers with a dimension comparable to the wavelength. It could be shown that at P-band these Mie oscillations can explain the high variability of cross polarised backscatter measured for forest stands consisting of smaller trees (biomass typically $< 0.7 \text{ m}^3$).

The conclusion is that Mie oscillations and tree or stand geometry can lead to biases in the parameterisation of a semi-empirical model and should therefore be considered.

The newly developed simulation approach is based on the discrete dipole approximation (DDA) that gained popularity in recent publications for the simulation of backscatter of different particles mainly at optical frequencies. In this thesis, the formulation of the DDA is adapted to the frequency modulated SAR signal. Additionally, the DDA is integrated in a SAR simulation environment mainly consisting of a sensor model and a realistic tree model. The possibility of simulating ionospheric effects is also discussed. The simulation software has been newly developed; the simulation outputs data products comparable to measured data. New in the proposed approach is the complexity of the physical formulation as well as the complexity of the tree

model. Until now, approaches have coped with the problem of the high computational demands in electromagnetic simulations by either reducing the object complexity or simplifying the calculation. Especially the interaction between individual scatterers has been neglected by many of the existing approaches in order to speed up the calculation. For the new simulation approach, the computational costs were reduced by introducing a new method of simulating *partially* focussed data products. For this kind of data only the backscatter variability of the object either in the azimuth or range dimension is considered. The consequent utilisation of the capabilities of state of the art multi-processor systems made it possible to simulate forest scenes consisting of geometrically complex trees in a realistic time while preserving a naturalistic formulation of the scattering problem with dipole interactions.

A variety of simulation runs showed that a realistic parameterisation of the forest geometry, especially in consideration of the thinning process, lead to simulated data that was in higher accordance with measured data than were existing simulation approaches. The measurements of both test sites were successfully reproduced in the simulation. The simulations were able to reproduce the strength of backscatter and the relation between scattering mechanisms of measured data. In addition, it was possible to confirm the effect of a layered vegetation volume found in the test areas. The simulation of a vegetation volume consisting of trees with variable heights lead to backscatter weaker than that of a forest with trees of equal heights. The dielectrical properties of wood and soil can be investigated in simulated scenarios. It could be shown that the conductivity of the soil affected the co-polarised mechanisms, whereas the conductivity of the wood mainly affected the cross-polarised backscatter.

The thesis explains the influence of different mechanisms on the correlation between biomass and backscatter. Thinning, tree and stand geometry, and Mie oscillations were identified to be such mechanisms. A possible next step could be to develop corrections for site-specific parameters, so that global forest parameter inversions from polarimetric SAR becomes a realistic goal. The thesis shows further that only the preservation of sufficient natural complexity within a simulation results in line with measured data.

Zusammenfassung

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Untersuchung von Waldgebieten mittels voll polarimetrischem *synthetic aperture radar* (*SAR*). Das Ziel ist es, Mechanismen und Parameter zu beschreiben, die die gemessene Rückstreuung beeinflussen. Dazu werden Methoden entwickelt, um strukturelle Vegetationsparameter in Beziehung zu setzen mit Messparametern eines voll polarimetrischen *SAR*-Systems. Zur Überprüfung der Methodik, aber auch um Hypothesen zu entwickeln und zu testen, wird zusätzlich ein Verfahren entwickelt, realitätsnahe *SAR*-Daten zu simulieren. Unter Beibehaltung einer physikalisch möglichst exakten Formulierung wird die simulierte Rückstreuung eines aus strukturell komplexen, naturnahen Einzelbaummodellen aufgebauten Simulationsszenarios in Datenprodukte umgesetzt, die direkt vergleichbar sind mit den *in natura* erhobenen *SAR*-Messdaten. Es wird gezeigt, dass Unterschiede zwischen beobachteter und simulierter Rückstreuung auf Rückstreumechanismen zurückgeführt werden können, die mit strukturellen Eigenschaften der Vegetation schlüssig in Zusammenhang gebracht werden können. Diese Strukturabhängigkeit wird in mehreren Testgebieten nachgewiesen und durch simulierte Daten nachvollzogen. Die Berücksichtigung von verschiedenen Vegetationsparametern hat das Potential, die Zuverlässigkeit der Schätzung weiterer Parameter wie der Biomasse aus *SAR*-Daten zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einführung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Stand der Forschung	4
1.2.1 Polarimetrisches SAR	4
1.2.2 Vegetationsanalyse mittels polarimetrischen <i>SAR</i> -Systemen	7
1.2.3 Simulation von <i>SAR</i> -Abbildungen	12
1.2.4 Sicherstellung der Datenqualität	15
1.3 Physikalische Grundlagen	17
1.3.1 Maxwell-Gleichungen und die elektromagnetische Welle	17
1.3.2 Grundlagen der numerischen Simulation von Rückstreuprozessen	19
1.4 Die Abbildung mittels polarimetrischen <i>SAR</i> -Systemen	22
1.4.1 Geometrie	22
1.4.2 <i>SAR</i> -Fokussierung	23
1.5 Fragestellung	25
1.6 Aufbau der Arbeit	28
2 Methoden	29
2.1 Simulation von SAR-Daten	29
2.1.1 Systemmodell (Sender)	31
2.1.2 Ausbreitung bis zum Objekt	35
2.1.3 Objektinteraktion	39
2.1.4 Weg zum Sensor	49
2.1.5 Empfänger	50
2.1.6 Datensimulation	51

2.1.7	Implementierung der Simulation	54
2.1.8	Interaktionen in der <i>discrete dipole approximation (DDA)</i>	55
2.2	Baummodell und Modellierung eines Waldstandortes	57
2.2.1	Baummodell	57
2.2.2	Vereinfachung und Anpassung des Baummodells zur Verwendung mit der DDA	57
2.2.3	Simulation des Waldbestandes	63
2.3	Polarimetrische Datenverarbeitung	67
2.3.1	Polarisation	67
2.3.2	Kalibration	68
2.3.3	Streuematrix und Basistransformation	70
2.3.4	Streuvektor	71
2.3.5	Polarimetrische Dekompositionen	72
2.4	Radarsystem, Testgebiete und Daten	76
2.4.1	Radarsystem	76
2.4.2	Testgebiet Hinwil	76
2.4.3	Testgebiet Krycklan	78
2.4.4	Forstinventar	80
2.5	Vegetationsstruktur und polarimetrische Messparameter	84
2.5.1	Einleitung	85
2.5.2	Analyse des Zusammenhangs zwischen Vegetationsstruktur und Rückstreuung	88
2.5.3	Weitere Einflussfaktoren	104
2.5.4	Vegetationsstruktur und polarimetrische Dekompositionsparameter	104
2.5.5	Methodisches Vorgehen	106
3	Resultate	107
3.1	Vergleich bestehender Modelle	109
3.2	Datengrundlage und Datenverarbeitung in den Testgebieten	116
3.3	Radiometrische Normalisierung	118
3.4	Abweichungen vom Modell	123
3.4.1	Abweichungen durch ungeeignete Stichprobenflächen	123
3.4.2	Abweichungen durch Lage der Stichproben	124

3.4.3	Abweichungen durch Mie-Oszillationen	129
3.5	Rückstreuung und Biomasse	134
3.5.1	Volumenstreuung	135
3.5.2	Kopolare Mechanismen	140
3.5.3	Übersicht	144
3.6	Residuen und Strukturparameter	146
3.7	Ausdünnung und Rückstreuung	158
3.7.1	Einzelbaumrückstreuung	159
3.7.2	Ausdünnung in den Testgebieten	167
3.8	Parameter der inkohärenten Dekomposition und Vegetationsparameter	179
3.9	Anknüpfung an bestehende Resultate	186
3.10	Simulation von <i>SAR</i> -Daten	189
3.10.1	Simulierte Auswirkungen verschiedener Vegetationsparameter	189
3.10.2	Vergleich der Simulation mit den <i>SAR</i> -Messungen	196
3.10.3	Vergleich mit bestehenden Simulationsresultaten	203
4	Synthese	207
4.1	Synopsis	207
4.1.1	Stabilität der Messung, räumliche Skala	208
4.1.2	Die Waldstruktur	209
4.1.3	Simulation	214
4.2	Synthese und Schlussfolgerung	216
4.3	Ausblick	221
	Literaturverzeichnis	223
A	Abkürzungen, Variablen und Symbole	235
A.1	Abkürzungen und Akronyme	235
A.2	Variablen und Symbole	237
B	Anhang Kapitel 1	243
B.1	Herleitung der Grundlage der numerischen Simulation von Rückstreuprozessen	243
B.2	Rückstreu-Konventionen <i>backscatter conventions</i>	246
C	Anhang Kapitel 2	249

C.1	Ionosphäreneffekte in der Simulation	249
C.1.1	Laufzeitverzögerung und <i>chirp</i> -Längenänderung	249
C.1.2	Faraday-Rotation	250
C.2	Herleitung der Grundgleichung der DDA	254
C.3	Polarisierbarkeitstensor eines zylindrischen Dipols	258
C.4	Anpassung der DDA an frequenzmodulierte Signale	259
C.5	Der <i>thinning detector</i>	263
D	Anhang Kapitel 3	271
D.1	Anhang zum Modellvergleich	271
D.2	Stichproben im Testgebiet Hinwil	273
D.3	Stichproben im Testgebiet Krycklan	274
D.4	Masse zur Beurteilung der Anpassungsgüte	276
D.5	Definitionen zur radiometrischen Normalisierung	278
D.6	Stichprobenflächen und Bedeckungsgrad	279
D.7	Fehlende Mie-Oszillationen in den kopolaren Mechanismen	280
D.8	Residuen des 2. Modells und Strukturparameter	281
D.9	Stichproben für den Vergleich von Bodentypen	282
	Danksagung	283
	Lebenslauf	285

Abbildungsverzeichnis

1.1	Frequenzbänder	2
1.2	Testgebietes <i>Hinwil</i> in zwei Frequenzen	3
1.3	Streumechanismen im Wald	3
1.4	Struktur der Biomasse.	10
1.5	Interferenz	21
1.6	Huygen-Fresnel Prinzip	21
1.7	Radargeometrie	22
2.1	Die vier in die Simulation integrierten Interaktionswege.	36
2.2	Frequenzmoduliertes Signal im <i>near field</i>	46
2.3	Frequenzmoduliertes Signal im <i>far field</i>	47
2.4	Wirksamkeit der Korrektur	48
2.5	Baummodell	58
2.6	Anzahl der Einzelzylinder in Beziehung zur berücksichtigten Biomasse	59
2.7	Simulierte Rückstreuung eines vereinfachten Einzelbaumes	60
2.8	Vereinfachung des Baummodells	61
2.9	Baummodell Nguyen 2006	62
2.10	Baummodell Badereau 2003	62
2.11	Simulation zweier vertikaler Zylinder, senkrechte Beleuchtung	63
2.12	Simulation zweier vertikaler Zylinder, schräge Beleuchtung	64
2.13	Wachstumsverhalten eines Waldbestandes	66
2.14	Relative Permittivität des Holzes	67
2.15	Polarisationsellipse	69
2.16	<i>pure target</i> und <i>distributed target</i>	72
2.17	Übersichtskarte, Testgebiet <i>Hinwil</i>	77
2.18	Flugwege E-SAR P-Band, <i>Hinwil</i>	78
2.19	Flugwege P-Band, <i>Krycklan</i>	79

2.20	Karte Testgebiet <i>Hinwil</i>	81
2.21	Beprobte Waldbestände (<i>forest stands</i>) im Testgebiet <i>Krycklan</i>	84
2.22	Resultate nach Neumann	88
2.23	Methoden-Flussdiagramm	92
2.24	Mie Streuung	93
2.25	Bildliche Darstellung einer Ausdünnungslinie	100
2.26	<i>thinning detector</i>	102
2.27	Idealisierte Baumpositionen	103
3.1	Vergleich verschiedener Modelle	111
3.2	Vergleich verschiedener Modelle nach Festlegen der Bezugsgrößen.	112
3.3	Vergleich verschiedener Modelle, natürliche Einheiten.	113
3.4	Zweites Modell, $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$	114
3.5	Lokaler Einfallswinkel der Stichprobenflächen in den 12 Fluglinien, <i>Hinwil</i>	119
3.6	Radiometrische Normalisierung und Einfallswinkel, <i>Hinwil</i>	120
3.7	Lokaler Einfallswinkel der Stichprobenflächen, <i>Krycklan</i>	121
3.8	Radiometrische Normalisierung und Einfallswinkel, <i>Krycklan</i>	122
3.9	Stichprobenflächen mit Baumpositionen, <i>Hinwil</i>	124
3.10	Instabilität der Stichproben, Gebiet t02, Volumenstreuung, <i>Krycklan</i>	126
3.11	Stichproben mit mehr als 2 dB Abweichung, <i>Krycklan</i>	127
3.12	Instabilität der Stichproben, Gebiet t01, Volumenstreuung, <i>Krycklan</i>	128
3.13	Stichproben im Testgebiet t01 <i>Krycklan</i> mit mehr als 2 dB Abweichung	129
3.14	Kopolare Mechanismen in Abhängigkeit der Einfallswinkeländerung, <i>Krycklan</i> . .	130
3.15	Simulierte Volumenstreuung eines Einzelbaumes	131
3.16	Stichproben-Instabilität anhand der Gesamtbiomasse, Volumenstreuung, <i>Krycklan</i>	133
3.17	Stichproben-Instabilität anhand der Einzelbaumbiomasse, Volumenstreuung, <i>Kry-</i> <i>cklan</i>	133
3.18	Volumenstreuung aller berücksichtigter Stichprobenkreise, <i>Hinwil</i>	136
3.19	Volumenstreuung Stichprobenkreise > 40% Bedeckung, <i>Hinwil</i>	138
3.20	Volumenstreuung, Stichproben zusammengefasst, <i>Hinwil</i>	138
3.21	Volumenstreuung, <i>Krycklan</i>	139
3.22	Kopolare Streumechanismen, Testgebiet <i>Hinwil</i>	141
3.23	Oberflächenstreuung, <i>Krycklan</i>	143

3.24	Zweifachreflexion, <i>Krycklan</i>	143
3.25	Residuen des 1. Modells, kopolare Mechanismen, <i>Hinwil</i>	148
3.26	Residuen des 1. Modells, kreuzpolare Streuung, <i>Hinwil</i>	148
3.27	Residuen des 1. Modells in Abhängigkeit von Strukturparametern, <i>Hinwil</i>	150
3.28	Residuen des 1. Modells, kreuzpolare Streuung, nach Korrektur durch Strukturparameter, <i>Hinwil</i>	151
3.29	Residuen des 1. Modells, kopolare Mechanismen, nach Korrektur durch Strukturparameter, <i>Hinwil</i>	151
3.30	Einfluss der Schichtung, <i>Krycklan</i>	156
3.31	Einfluss der Kronenlänge, <i>Krycklan</i>	157
3.32	Einfluss der Bodenfeuchte, <i>Krycklan</i>	158
3.33	Simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes, Streumechanismen	161
3.34	Simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes, Kanäle	162
3.35	Schätzung des r -Wertes Waldstandorte $\geq 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, <i>Krycklan</i>	165
3.36	Schätzung des r -Wertes Waldstandorte $< 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, <i>Krycklan</i>	165
3.37	Mittlerer Abstand zwischen Einzelbäumen, <i>Hinwil</i>	168
3.38	<i>thinning detector</i> , <i>Hinwil</i>	169
3.39	Gesamtbiomasse pro Fläche und Einzelbaumbiomasse, <i>Krycklan.</i>	171
3.40	Biomasse der Einzelbäume, beide Testgebiete	172
3.41	Biomasse der Einzelbäume, <i>Krycklan</i>	173
3.42	Schätzung des d -Wertes, alle Stichproben mit $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, <i>Krycklan</i>	173
3.43	Schätzung des d -Wertes, alle Waldstandorte, <i>Krycklan</i>	174
3.44	Werte des Rückstreuparameters f in Abhängigkeit von r und d	177
3.45	Aufschlüsselung der Stichproben in Ausdünnungslinien, <i>Krycklan</i>	178
3.46	Parameter der Cloude-Dekomposition, <i>Hinwil.</i>	180
3.47	α -Parameter, Testgebiet <i>Krycklan</i>	182
3.48	α -Parameter, der Ausdünnungslinien, <i>Krycklan</i>	182
3.49	Entropie-Parameter, der Ausdünnungslinien, <i>Krycklan</i>	183
3.50	Anisotropie-Parameter, der Ausdünnungslinien, <i>Krycklan</i>	183
3.51	α und Biomasseabweichung, Testgebiet t01, <i>Krycklan</i>	184
3.52	Korrelation zwischen Biomasseabweichung und Dekompositionsparameterabweichung, Testgebiet t01 <i>Krycklan</i>	185

3.53	Resultate nach Soja	187
3.54	Schätzung der Ausdünnung, <i>Remningstorp</i>	188
3.55	Streuung und Baumpositionen	190
3.56	Simulierte Auswirkung variabler Bodenfeuchte	191
3.57	Simulierte Auswirkung variabler Holzfeuchtigkeit	192
3.58	Simulierte Auswirkung variabler Bodenrauigkeit	192
3.59	Bodentypen in <i>Krycklan</i>	194
3.60	Simulation eines geschichteten Waldes	195
3.61	Simulation im Vergleich zu den Messungen im Testgebiet <i>Hinwil</i>	198
3.62	Simulation im Vergleich zu den Messungen im Testgebiet <i>Hinwil</i> , inkohärente Dekomposition nach Cloude	199
3.63	Simulation in der Entropie- α -Ebene	200
3.64	Vergleich Simulation und E-SAR-P-Band, <i>Hinwil</i>	201
3.65	Simulation im Vergleich zu den Daten aus dem Testgebiet <i>Krycklan</i>	202
3.66	Resultate Thirion 2006	203
3.67	Resultate Praks 2003	204
3.68	Resultate PolSARPro Simulator	205
3.69	Resultate Disney 2006	206
B.1	Konventionen	247
C.1	Simulation einer idealen Kugel	251
C.2	Längenänderung und Faraday-Rotation	252
C.3	Demoduliertes <i>chirp</i> -Signal	253
C.4	Puls ohne Frequenzmodulation, <i>near field</i>	261
C.5	Puls ohne Frequenzmodulation, <i>far field</i>	262
C.6	Dipolsignal und polarisierendes Signal	262
C.7	Ausdünnungslinien	264
C.8	Idealisierte Rückstreuung mit <i>thinning</i>	265
C.9	Linearisierte Ausdünnungslinien	266
C.10	<i>thinning detector</i> , scheinbare Ausdünnungslinien	268
C.11	Scheinbare Ausdünnungslinien	269
C.12	Rückstreuung der scheinbaren Ausdünnungslinien	270

D.1	Rückstreuung in den Stichprobenflächen, <i>Hinwil</i>	279
D.2	Oberflächenstreuung, <i>Krycklan</i>	280
D.3	Residuen des 2. Modells in Abhängigkeit von Strukturparametern, <i>Hinwil</i>	281
D.4	Stichproben für den Vergleich von Bodentypen, <i>Krycklan</i>	282

Tabellenverzeichnis

2.1	Teilschritte der Simulation	32
2.2	Berücksichtigte Biomasse der Baummodelle	59
2.3	Spezifikationen des E-SAR-Systems	77
2.4	Fluglinien der <i>full-pol</i> P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet <i>Hinwil</i> am 11.09.2006.	78
2.5	Fluglinien der <i>full-pol</i> P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet <i>Krycklan</i> am 14.10.08.	79
2.6	Fluglinien der <i>full-pol</i> P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet <i>Krycklan</i> am 15.10.08.	80
2.7	Berücksichtigte Bestandesparameter, <i>Hinwil</i>	82
2.8	Berücksichtigte Einzelbaumparameter, <i>Hinwil</i>	83
2.9	Vergleich der Erhebungsmethodik für Vegetationsparameter	85
3.1	Übersicht über empirische Modelle zur Biomasseschätzung	110
3.2	Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 75 \text{ t /ha}$	113
3.3	Radiometrische Normalisierung, Streumechanismen, <i>Hinwil</i>	119
3.4	Radiometrische Normalisierung, Kanäle, <i>Krycklan</i>	121
3.5	Parametrisierung des 1. Modells, Kreuzpolare Streuung, <i>Hinwil</i>	137
3.6	Parametrisierung des 2. Modells, <i>Hinwil</i>	137
3.7	Parametrisierung des 1. Modells, Kreuzpolare Streuung, <i>Krycklan</i>	139
3.8	Parametrisierung des 2. Modells, <i>Krycklan</i>	140
3.9	Parametrisierung des 1. Modells, Oberflächenstreuung, <i>Hinwil</i>	141
3.10	Parametrisierung des 1. Modells, Zweifachreflexion, <i>Hinwil</i>	142
3.11	Parametrisierung des 1. Modells, Oberflächenstreuung, <i>Krycklan</i>	143
3.12	Parametrisierung des 2. Modells, <i>Krycklan</i>	144
3.13	Parametrisierung des 1. Modells, Zweifachreflexion, <i>Krycklan</i>	144

3.14	Parametrisierung des 2. Modells, <i>Krycklan</i>	144
3.15	Zusammenhang Strukturparameter und Residuen, <i>Hinwil</i>	149
3.16	Residuen des 1. Modells, <i>Hinwil</i>	152
3.17	Residuenkorrektur Einfallswinkel - Strukturparameter, <i>Hinwil</i>	153
3.18	1. Modell nach Residuenkorrektur, <i>Hinwil</i>	154
3.19	Zusammenhang Strukturparameter und Rückstreuung	154
3.20	Residuen des 1. Modells, <i>Krycklan</i>	158
3.21	1. Modell nach Residuenkorrektur, Testgebiet <i>Krycklan</i>	159
3.22	Schätzung des Parameters r , Oberflächenstreuung, <i>Hinwil</i>	163
3.23	Schätzung des Parameters r , Zweifachreflexion, <i>Hinwil</i>	163
3.24	Schätzung des Parameters r , Kreuzpolare Rückstreuung, <i>Hinwil</i>	164
3.25	Schätzung Einzelbaumreflexion r , <i>Hinwil</i>	169
3.26	Schätzung Parameter f , <i>Hinwil</i>	169
3.27	Ausdünnungsparameter, <i>Krycklan</i>	175
3.28	Ausdünnung und 1. Modell, <i>Krycklan</i>	176
3.29	Relative Permittivität des Bodens und des Holzes	191
3.30	Parameter für die Simulation, Testgebiet <i>Hinwil</i>	196
3.31	Parameter für die Simulation, <i>Krycklan</i>	201
A.1	Abkürzungen und Akronyme	236
A.2	Symbole und Variablen	242
D.1	Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 50 \text{ t /ha}$	271
D.2	Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 100 \text{ t /ha}$	272
D.3	Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 125 \text{ t /ha}$	272
D.4	Stichprobennummerierung, <i>Hinwil</i>	273
D.5	Stichprobennummerierung, <i>Krycklan</i>	275

1 Einführung

Dieses einführende Kapitel hat zum Ziel, zur Fragestellung hinzuführen, die dieser Arbeit zu Grunde liegt. Dafür wird nach einer allgemeinen Einleitung in die Thematik anhand des aktuellen Forschungsstandes gezeigt, in welchen Bereichen offene Forschungsfragen zu beantworten sind. Die Fragestellung dieser Arbeit orientiert sich an diesem aktuellen Forschungsstand.

1.1 Einleitung

Aktive Fernerkundungssysteme sind dazu in der Lage, ihr Testgebiet selbst zu beleuchten und sind dadurch nicht auf natürliche Strahlungsquellen angewiesen. *Synthetic Aperture Radar (SAR)* Systeme sind aktive Fernerkundungssysteme, die sich durch die Möglichkeit auszeichnen, die gemessene Reflektivität von Objekten in ein Bild umzusetzen. Die Wellenlänge und auch Polarisation der beleuchtenden Strahlung sind in aktiven Systemen kontrollierbar.

Das aktive Prinzip hat gegenüber passiven optischen Systemen einige Vorzüge. Die natürliche Beleuchtung z. B. ist für die Durchführung einer Messung nicht kritisch. Üblicherweise operieren *SAR*-Systeme in Ausschnitten aus dem Mikro- und teilweise auch aus dem Radiowellenspektrum, die im Frequenzbereich zwischen $f \approx 30 \text{ MHz} - 300 \text{ GHz}$ liegen (Wellenlänge $\lambda \approx 10 \text{ m} - 0.001 \text{ m}$). Das elektromagnetische Spektrum in diesem Frequenzbereich wird in Bänder unterteilt, deren Kennzeichnungen in ABB. 1.1 ersichtlich sind. Unterhalb von 10 GHz zeichnet sich die Atmosphäre durch einen hohen Transmissionsgrad im «Radiofenster» aus. Die für *SAR*-Applikationen verwendeten Frequenzbänder können so gewählt werden, dass die Atmosphäre mit ihren meteorologischen Erscheinungen (Wasserdampf, Wolken) nahezu transparent erscheint, was besonders in tropischen Regionen Möglichkeiten zur kontinuierlichen Erdbeobachtung eröffnet. Die Beobachtung dieser Regionen mit optischen Systemen ist auf Grund der nahezu täglich präsenten dichten Bewölkung erschwert. Dennoch ist das Messresultat eines aktiven *SAR*-Systems nicht gänzlich unabhängig von tageszeitlichen, meteorologischen und atmosphärischen Einflüssen. Zwar bleibt das Messverfahren weitgehend unbeeinflusst, jedoch ändern sich unter Umständen die Eigenschaften der untersuchten Objekte in Abhängigkeiten von den oben genannten Parametern.

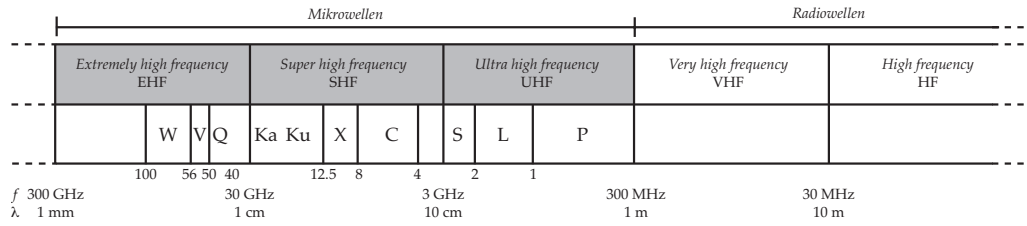


ABB. 1.1: Ausschnitt aus dem tieffrequenten elektromagnetischen Spektrum mit den gängigen Bandbezeichnungen. Mod. nach [Curlander 91].

Die Information über die abgebildeten Objekte fließt vor allem durch geometrische und dielektrische Objekteigenschaften ins Messergebnis ein. Diese Eigenschaften sind stark abhängig von der zur Messung verwendeten Frequenz. Die Streumechanismen sind frequenzabhängig. Augenfällig wird dies durch einen Vergleich von Daten eines hochfrequenten X-Band-Systems ($f \approx 10$ GHz) mit einer Aufnahme eines niederfrequenten Systems (z. B. P-Band, $f \approx 0.4$ GHz). Während im X-Band-Bild deutliche Flächentexturen erkennbar sind, wirken die selben Flächen im P-Band-Bild glatt und durch die spekulare Reflexion weg vom Sensor dunkel, was in ABB. 1.2 deutlich wird.

Auch die Abbildung eines ausgedehnten Vegetationsvolumens ist stark von der Frequenz beeinflusst. Da die Eindringtiefe in ein Volumen eine Funktion der Wellenlänge ist, bilden die unterschiedlichen Frequenzen unterschiedliche Tiefen des Volumens ab. Somit sind auch die auftretenden Streuprozesse (Streumechanismen) frequenzabhängig, was in ABB. 1.3 schematisch dargestellt wird.

Die Verwendung eines polarimetrischen *SAR*-Systems für die Untersuchung von Vegetation, also eines Systems, das neben der Stärke der Rückstreuung auch den Polarisationszustand der rückgestreuten Strahlung messen kann, beruht auf grundsätzlichen Überlegungen: Die Fähigkeit, Vegetationsvolumina zu durchdringen, steigt mit zunehmender Wellenlänge. Werden lange Wellenlängen verwendet ($\lambda \approx 10$ m – 0.1 m), kann ein grosses Vegetationsvolumen erfasst werden und zum rückgestreuten Signal beitragen. Da die innere Geometrie des Vegetationsvolumens direkt auf den Polarisationszustand der einfallenden Strahlung einwirkt, bietet sich mit polarimetrischen *SAR*-Systemen, die in langwelligen Bändern operieren, eine Möglichkeit, Informationen über das gesamte Vegetationsvolumen oder zumindest über grosse Ausschnitte davon zu erhalten. Dies im Gegensatz zur optischen Messung, in welche besonders bei dichter Vegetation typischerweise nur Informationen einer oberflächennahen Schicht einfließen, da die Eindringtiefe der Strahlung um

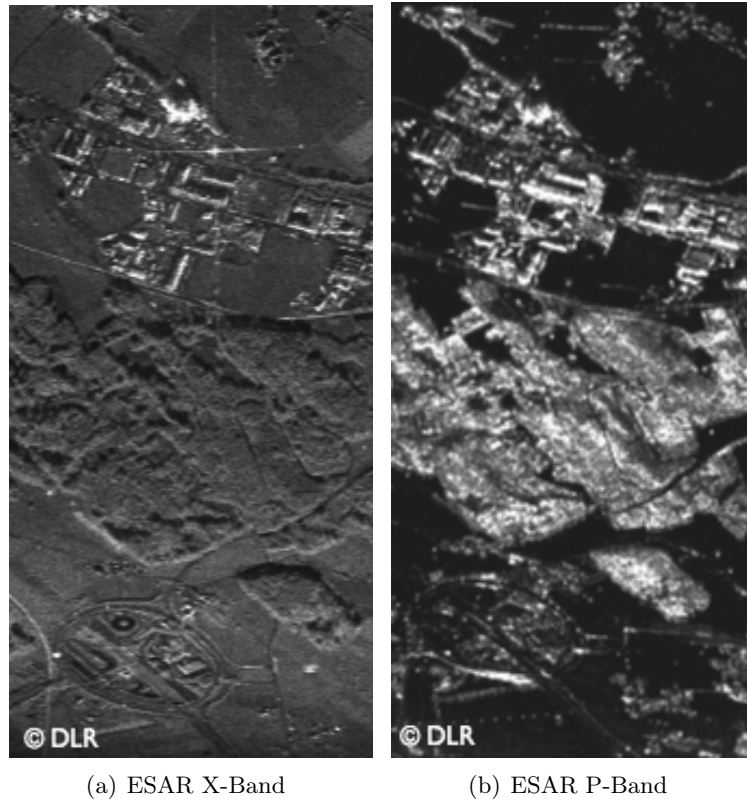


ABB. 1.2: Ausschnitt des Testgebietes *Hinwil* in zwei Frequenzen, HH-Kanal, Aufnahmedatum 29.10.2003. Deutlich wird das Fehlen von Texturen im tieffrequenten P-Band für Landwirtschaftsflächen.

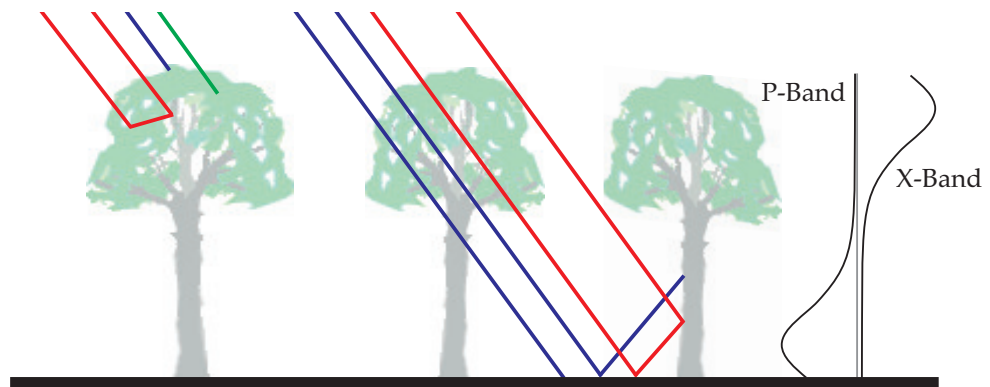


ABB. 1.3: Streumechanismen in Abhängigkeit der Penetrationstiefe. Im X-Band finden die relevanten Streumechnismen in der Kronenschicht statt, im P-Band typischerweise mit Bodeninteraktion.

Größenordnungen kleiner ist. Die Grundidee der *SAR*-Polarimetrie ist die Aufschlüsselung eines komplexen Signals, das durch die kohärente Überlagerung verschiedener Streuprozesse entstanden ist, in einfacher interpretierbare Komponenten, um dadurch Rückschlüsse auf geometrische und dielektrische Eigenschaften des untersuchten Objektes zu ziehen.

1.2 Stand der Forschung

Der hier folgende Überblick über den Stand der Forschung deckt nach einer allgemeinen Einführung ins Thema der polarimetrischen *SAR*-Fernerkundung hauptsächlich drei Forschungsfelder ab. Einerseits die Methodik der *SAR*-Polarimetrie, die unerlässlich ist für die Informationsgewinnung aus polarimetrischen *SAR*-Daten, andererseits die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen bio-physikalischen Vegetationsparametern und *SAR*-Messgrößen und die Simulation von *SAR*-Signalen von (ebenfalls simulierter) Vegetation.

1.2.1 Polarimetrisches SAR

Jedes *SAR*-System sendet polarisierte elektromagnetische Strahlung zur Beleuchtung der Szene und empfängt über die selbe oder eine weitere Antenne wiederum nur den polarisierten Anteil der rückgestreuten Strahlung. Die Polarisation der Empfangsantenne kann dabei gleich oder abweichend von der Sendepolarisation sein. Üblicherweise werden Kombinationen von Sende- und Empfangspolarisationen verwendet, die zueinander kolinear oder orthogonal sind. Eine solche Sende- und Empfangskonfiguration wird Kanal genannt. Die vollständige polarimetrische Messung erfolgt über vier Kanäle, hat also vektoriellen Charakter. Die Kombinationen aus horizontalem Senden und horizontal polarisiertem Empfangen (HH) respektive vertikales Senden und Empfangen (VV) werden als kopolare Kanäle bezeichnet, die zueinander orthogonalen Sende- und Empfangskonfigurationen HV und VH als kreuzpolare Kanäle. Die polarimetrische *SAR*-Messung verfügt gegenüber der Messung eines skalaren *SAR*-Systems, welches zur gleichen Zeit nur eine Sende- und Empfangskonfiguration verwendet, über einen erhöhten Informationsgehalt. Dieser erweiterte Informationsgehalt verbessert oder ermöglicht erst eine Bildsegmentierung, was van Zyl [vanZyl 89] gezeigt hat und durch Lee et al. [Lee 01] quantitativ belegt wird.

Neben der *full-pol* oder *quad-pol*-Messung und der skalaren *SAR*-Messung kommen auch Systeme mit nur zwei Empfangskanälen zum Einsatz, sogenannte *dual-pol*-Systeme. Diese erfassen zwar nicht die gesamte verfügbare Information, sind im Vergleich zu *quad-pol*-System aber

einfacher und günstiger zu bauen (geringere Datenrate, geringerer Energieverbrauch) und weisen auch Vorteile auf: die verfügbare Dopplerbandbreite kann höher liegen und es kann im Vergleich zu einem voll polarimetrischen System die doppelte Streifenbreite bei gleicher Pulsrepetitionsfrequenz abgebildet werden.

Dass die bekannte Polarisation der durch Antennen abgestrahlten Strahlung einen prinzipiellen Mehrwert darstellt, wurde durch Sinclair in den späten 1940er-Jahren propagiert [Sinclair 50]. Die Arbeiten von Kennaugh und Huynen bildeten die theoretische Grundlage zur polarimetrischen Objektbeschreibung durch Streumatrizen [Kennaugh 52] [Huynen 65].

Das erste flugzeuggestützte voll polarimetrische *SAR*-System wurde 1988 in Betrieb genommen. Das *Airborne SAR (AIRSAR)* des *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* war in der Lage, voll-polarimetrische Daten in verschiedenen Frequenzbändern (C-, L- und P-Band) zu liefern. Mit diesem ersten realen System rückte das Problem der Kalibration von polarimetrischen *SAR*-Daten in den Vordergrund, was die Arbeiten von Zebker, van Zyl und Freeman motiviert hat [vanZyl 90] [Zebker 90] [Zebker 91b] [Freeman 92b]. Mit der Verfügbarkeit von voll-polarimetrischen *SAR*-Bildern entstanden Arbeiten von Evans, van Zyl und Zebker zur Bildsegmentierung, worin weiter das Konzept der polarimetrischen Signatur eingeführt wurde [Evans 88], [vanZyl 89], [Zebker 91a]. Das *AIRSAR*-System wurde bereits 1989 auch über Wald eingesetzt und die prinzipielle Abhängigkeit der polarimetrischen Rückstreuung von der Biomasse erkannt [Durden 89] [Durden 91].

Die durch das *AIRSAR*-System ermöglichten Erfahrungen dienten als Grundlage für den Bau und Betrieb des ersten weltraumgestützten voll-polarimetrischen *SAR*-Systems, dem *SIR-C*-System (*Shuttle Imaging Radar System C*) der NASA (*National Aeronautics and Space Administration*)/JPL im Jahre 1994.

Heute sind eine grössere Zahl flugzeug- und orbitgestützter Systeme operationell, die polarimetrische *SAR*-Daten liefern können.

Neben der Messung der Stärke der Rückstreuung bietet die polarimetrische *SAR*-Messung die Möglichkeit, die im Signal überlagerten Streumechanismen aufzuschlüsseln. Verschiedene Verfahren zerlegen die Messung in elementare, zueinander meist orthogonale Streumechanismen. Es ist also möglich, die Mechanismen, die zur Rückstreuung in einem Bildelement beigetragen haben zu identifizieren und zu quantifizieren. Basierend auf Huynen's Formalismus der Streumatrix [Huynen 65] bauen die Arbeiten von Cloude [Cloude 86], Holm [Holm 88], Pottier [Pottier 90], Cameron und Leung [Cameron 90], Ulaby [Ulaby 90a] und Krogager [Krogager 93]

auf. In [Cloude 92] weist Cloude nach, dass die Zerlegung in meist drei elementare, unabhängige Streumechanismen eindeutig möglich ist. Eine Übersicht über Dekompositionstechniken geben Cloude und Pottier in [Cloude 96].

Du und Lee [Du 96] sowie Cloude und Pottier [Cloude 97] wenden Cloude's Dekompositionstheorem für die Segmentierung von Bildinhalten an und zeigen, dass die Bildsegmentierung sich durch Dekompositionstechniken verbessern lässt.

Freeman [Freeman 98] zeigt ein modellbasiertes Verfahren, das die gemessene polarimetrische Rückstreuung ebenfalls in elementare Mechanismen zerlegt, die jedoch nicht voneinander unabhängig sind. Der modellbasierte Ansatz wird durch Yamaguchi auf ein Dekompositionsverfahren erweitert, das die polarimetrische Information in vier Streumechanismen zerlegt [Yamaguchi 05]. Sato [Sato 12] und Shan [Shan 12] erweitern und verbessern dieses Dekompositionsverfahren.

Andere neuere Ansätze zur polarimetrischen Dekomposition nutzen weitere mathematische Verfahren, um die Streumatrix in interpretierbare Bestandteile zu zerlegen oder Dekompositionsparameter mit geringerem rechnerischen Aufwand oder mit grösserer Robustheit zu schätzen. Praks zeigt, dass die Eigenwert-basierte Schätzung von Dekompositionsparametern nach Cloude vereinfacht werden kann [Praks 00] und Touzi erweitert in [Touzi 07] das Konzept der Eigenwert-basierten Dekomposition, indem neue Algorithmen die Stabilität der Schätzung erhöhen. Mathematisch sind Matrix-Dekompositionen nicht nur durch die Eigenwert-Dekomposition, sondern auch durch weitere Verfahren möglich, so die polare Dekomposition in [Carrea 01] oder die Dekomposition mittels Quaternionen, einer Erweiterung der komplexen Zahlen, vorgeschlagen durch Souyris in [Souyris 06] [Souyris 07].

In der aktuellen Diskussion werden vor allem für satellitengestützte Anwendungen Systeme favorisiert, die nur über *eine* Sendpolarisation verfügen, aber dennoch zwei Polarisationen empfangen. Der Vorteil dieser Systeme liegt in den geringeren Anforderungen an die Energieversorgung und Datenspeicherung oder in der Möglichkeit, bei gleicher Pulsrepetitionsfrequenz gegenüber einem vollpolarimetrischen System die doppelte Streifenbreite abzubilden [Souyris 05]. Für solche *dual-pol* Systeme sind trotz reduziertem Informationsgehalt auch polarimetrische Verarbeitungstechniken wie Dekompositionsverfahren möglich, was Cloude zeigt [Cloude 12]. Die Verarbeitungstechniken solcher dual-pol-Daten werden unter dem Begriff *compact polarimetry* [Charbonneau 10], *partial polarimetry* oder *hybrid polarity* [Raney 07] zusammengefasst. Ziel der Verarbeitungstechniken ist es, von dual-pol-Systemen zumindest für gewisse Anwendungen

ähnliche Performanz zu erhalten, wie das bisher nur mit quad-pol-Systemen erreicht werden konnte.

Die Analyse der polarimetrischen Information in Streumechanismen ist an sich schon mit einer Bildsegmentierung gleichzusetzen. Es hat sich gezeigt, dass die polarimetrische Information der Streumatrix und insbesondere der daraus abgeleiteten Kovarianz- oder Kohärenzmatrix eine Klassifikation von polarimetrischen SAR-Bildern ermöglicht. VanZyl legt in [vanZyl 89] und [vanZyl 92] Verfahren dar, polarimetrische SAR-Bilder unter Ausnutzung der polarimetrischen Information zu segmentieren. Lee zeigt in [Lee 99a] ein Verfahren zur unüberwachten Klassifikation basierend auf polarimetrischen Dekompositionen, welches durch Ferro-Famil in [Ferro-Famil 01] erweitert wird.

An dieser Stelle soll auch auf die Arbeit von Hoekman [Hoekman 00] [Hoekman 02] [Hoekman 03] hingewiesen werden, in der ein Verfahren zur Bildsegmentierung gezeigt wird, das zwar die polarimetrische Information nutzt, aber nicht direkt auf Dekompositionsverfahren beruht.

Aktuell findet die polarimetrische Klassifikation, häufig auch unter Berücksichtigung mehrerer Frequenzen und in Kombination mit optischen oder LiDAR-Daten [Morsdorf 04], verschiedenste Anwendungsgebiete, wie geologisch-geomorphologische Fragestellungen [Saepuloh 12], Überflutungskartierung [Mason 12], Detektion von Einzelobjekten [Marino 10], Vegetationsanalyse [Skriver 12],[Lehmann 12], See-Eiskartierung [Berg 12], Untersuchungen von Stadtgebieten [Gamba 12], Kartierung von Erdbebenschäden [Wang 12], Schneekartierung [Schellenberger 12] etc.

1.2.2 Vegetationsanalyse mittels polarimetrischen SAR-Systemen

Für ökologische, aber durchaus auch für kommerzielle Fragestellungen, sind verschiedene Vegetationsparameter von grossem Interesse.

Diese Untersuchung der Biomasse und Biomassenstruktur ist für die Bewirtschaftung von Wäldern relevant wie auch für Ernteprognosen von Nahrungspflanzen, z. B. Reis [Le Toan 97], aber auch für das Verständnis globaler Stoffkreisläufe im Zusammenhang mit Fragen der globalen Erwärmung durch Treibhausgase [Bonan 92], [Saatchi 11a]. Die sich in Planung befindende BIOMASS-Mission der Europäischen Raumfahrtbehörde *European Space Agency ESA*) hat das Ziel, mittels eines P-Band-Systems in einer globalen Skala terrestrische Biomasse zu vermessen und in ihrer Veränderung zu überwachen [Le Toan 11].

Aus methodischer Sicht rückt die Untersuchung von bio-physikalischen Parametern wie Biomasse, aber auch Effekte von Bodenfeuchte auf die SAR-Messung, seit den 1970er Jahren ins Zentrum des Interesses [Drake 74], [Cihlar 75], [Choudhury 79], [Sader 87] und [Hajnsek 03].

Die Arbeiten von Ulaby, Boerner und Wu stellen einen Zusammenhang von Vegetationsbedeckung und Phasendifferenz zwischen den kopolaren polarimetrischen Kanälen fest [Ulaby 87] [Boerner 87] [Wu 87a] [Wu 87b] [Sader 87]. Somit wurde nachgewiesen, dass direkte SAR-Messgrößen abhängig von der Vegetationsbedeckung sind.

Durden untersucht in [Durden 89] die polarimetrische Signatur der Rückstreuung von Waldgebieten und stellt in [Durden 91] ein konzeptionelles Streumodell vor, das die Streumechanismen in Waldgebieten entschlüsselt. Die modellhafte Beschreibung von Streuprozessen im Wald wird durch Freeman in [Freeman 07] aufgegriffen. Demnach treten in Waldgebieten direkte Streuprozesse an der Vegetation in Erscheinung, sowie Mehrfachstreuungen mit Bodeninteraktion. Die Bodeninteraktion wird für tiefe Frequenzen stärker, da das Signal das Vegetationsvolumen durchdringen kann. Dies zeigt sich besonders deutlich in [Israelsson 97], wo mit Frequenzen im VHF-Band das Stammvolumen eines Waldes geschätzt wird.

Neben der Wellenlänge beeinflusst die Polarisierung die Rückstreuung von Vegetation. Anhand von flugzeuggestützten L-Band-Daten weist Hussin nach, dass die Rückstreuung im L-Band vor allem in den kreuzpolaren Kanälen (HV oder VH) mit Biomasse von Waldstandorten mit Nadelgehölzen (*Pinus eliotii*) korreliert [Hussin 91]. Der Zusammenhang zwischen kreuzpolarer Rückstreuung und Biomasse konnte in der Folge von weiteren Untersuchungen bestätigt werden, mit unterschiedlicher Korrelation annähernd für alle Frequenzen zwischen P-Band und C-Band [Ferrazzoli 97], [Hoekman 00].

In der Arbeit von LeToan wird der Zusammenhang zwischen Rückstreuung (*backscatter*) für die Frequenzbänder P-, L- und C-Band untersucht. In den Schlussfolgerungen wird die hohe Korrelation zwischen Rückstreuung und Biomasse im P-Band betont, was dieses Frequenzband vermehrt ins Zentrum von Vegetationsuntersuchungen gerückt hat. In der Arbeit wird weiter betont, dass ein Bedarf an physikalischen Modellen besteht, die anhand von Beobachtungen entwickelt worden sind [Le Toan 92]. Hier positioniert sich die vorliegende Arbeit. Obwohl auf die im Folgenden vorgestellte semi-emprische Herangehensweise zurückgegriffen wird, ist ein Hauptziel der Arbeit, physikalische Mechanismen zu identifizieren, die die gemessene Rückstreuung erklären.

Die Wahl des P-Bandes für die Datengrundlage der vorliegenden Arbeit erklärt sich dadurch, dass es mit den tiefen Frequenzen möglich ist, das Vegetationsvolumen weitgehend zu durchdringen. Es ist zu erwarten, dass die so gewonnene Information durch die Vegetationsstruktur eher beeinflusst wird als eine Abbildung in höheren Frequenzen, in der z. B. nur die Kronenschicht erfasst wird. Allerdings finden in den tieferen Frequenzen auch Bodeninteraktionen statt. So ist es möglich, dass die Bodenfeuchtigkeit die Messung der Vegetation beeinflusst und zu einer Verzerrung der Messung führt, was in [Pulliainen 96] gezeigt wird.

Die Ergebnisse von Hussin und Dobson bestätigen die gute Eignung tieferer Frequenzen für die Vegetationsanalyse [Hussin 91] [Dobson 92]. Es wird aber auch festgestellt, dass die Korrelation zwischen Biomasse und Rückstreuung rückläufig ist. Dobson braucht für das Phänomen den Begriff Sättigung (*saturation*). Dobson weist nach, dass die Sättigung in tieferen Frequenzen erst bei höherer Biomasse pro Fläche auftritt, was wiederum die Wahl des P-Bandes motiviert. Das Problem der Sättigung wird durch Imhoff weiter beleuchtet [Imhoff 95b] und durch Brolly und Woodhouse kritisch diskutiert [Woodhouse 06], [Brolly 10], [Brolly 12b].

Die Schätzung von Vegetationsparametern aus den polarimetrischen SAR-Daten, insbesondere die Beziehung zwischen der gemessenen Rückstreuung und der Biomasse, ist unter Verwendung semi-empirischer Modelle möglich, was in [Ferrazzoli 92], [Beaudoin 94], [Rauste 94], [Israelsson 94], [Rignot 95], [Ferrazzoli 97], [Paloscia 99], [Sun 00] und [Saatchi 00] gezeigt wird. Auch neuere Arbeiten von Watanabe [Watanabe 06] et al., Saatchi et al. [Saatchi 07] und Sandberg et al. [Sandberg 11] zeigen, dass zumindest für gemässigte und boreale Wälder der semi-empirische Ansatz zu aussagekräftigen Schätzungen der Biomasse führt.

Die verwendeten linearen oder nicht-linearen Regressionsmodelle schätzen entweder die Raddarrückstreuung σ oder einen biophysikalischen Parameter B (z. B. Biomasse) als abhängige Variable.

Neben dem semi-empirischen Ansatz wurden auch weitere statistische Ansätze auf die Eignung zur Biomasseschätzung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich verteilungsbasierte Verfahren ebenfalls zur Segmentierung von Szenen mit dichter Vegetation eignen [Kurvonen 99], [Oliver 00]. Da verteilungsbasierte Verfahren auf einer lokalen Statistik beruhen, könnten auch weitere Informationen über die Strukturiertheit der Vegetation abgeleitet werden. Wang et al. zeigen dies qualitativ in [Wang 08].

Die in letzter Zeit favorisierte *compact polarimetry* oder *partial polarimetry*-Systeme wurden auf Ihre Eignung zur Vegetationsanalyse untersucht. Lardeux zeigt in [Lardeux 11] vielversprechende Resultate, insbesondere bei der Klassifikation von Vegetationsflächen.

Auch wenn für niedrigere Biomassewerte die Korrelation in einem akzeptablen Wertebereich liegt, bleibt die Schwierigkeit, dass die Varianz, die mit Biomasseunterschieden erklärt werden kann, in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die nicht durch Biomasseunterschiede erklär-
bare Streuung. Imhoff stellt diesen Sachverhalt folgendermassen dar [Imhoff 95a]:

«In empirical studies of radar backscatter and biomass, the range of backscatter between stands with low biomass (5 tons/ha) and high biomass (400 tons/ha) is on the order of 5 to 7 dB and the variation between forest stands having nearly the same or identical biomass is 2-3 dB»

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist die Strukturiertheit der Biomasse, was in ABB. 1.4 dargestellt wird. Die Biomasse kann bei gleichem totalen Gehalt in unterschiedlicher Struktur vorliegen.

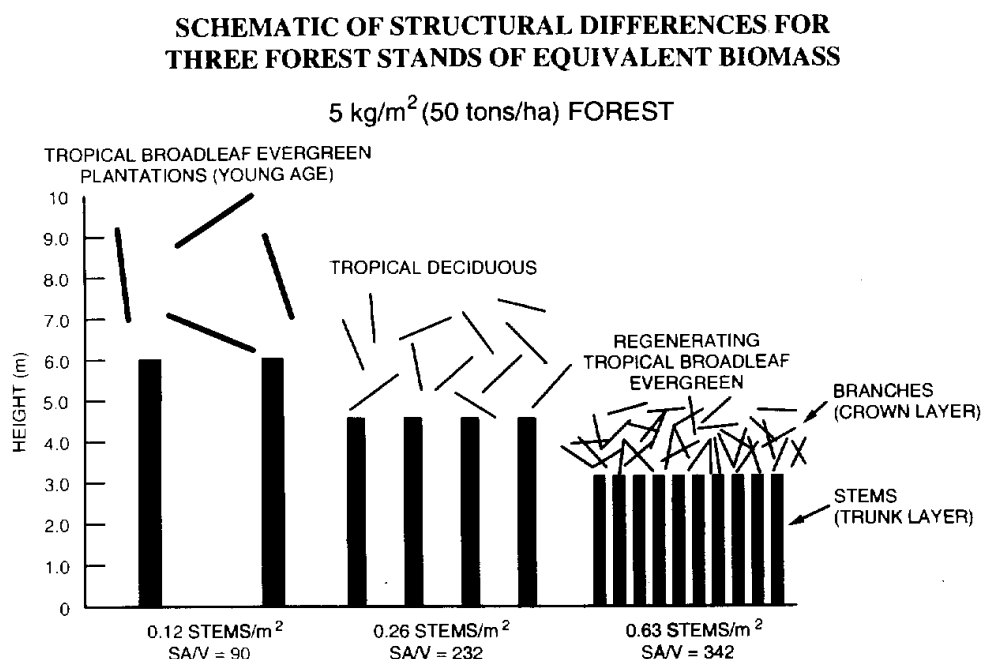


ABB. 1.4: Verschiedene Strukturen von Biomasse mit identischem totalem Gehalt. Aus: [Imhoff 95a].

Informationen über die Biomassestruktur bedeuten für die Biomasseschätzung einen deutlichen Mehrwert. In der Arbeit von Imhoff [Imhoff 95a] wird ein auf einem einfachen

Oberflächen-Volumen-Verhältnis beruhendes Mass eingeführt, das die Konsolidierung eines Standortes beschreibt und die Korrelation mit gemessenen Rückstreuwerten verbessern soll. In [Smith-Jonforsen 05] wird ein ähnlicher Index eingeführt, der die unterschiedliche Konsolidierung von Biomassestandorten berücksichtigt und eine höhere Korrelation mit modellierten und gemessenen Rückstreuwerten aufweist als die an einem Standort gemessene Biomasse.

Die Spezies als Parameter für die Erklärung von gemessenen Rückstreuwerten hat sich bei Vegetationsuntersuchungen als zweitrangig erwiesen. Watanabe et al. untersuchen in [Watanabe 06] die Abhängigkeit der Rückstreuung von Spezies und Strukturiertheit der Vegetation. Die Arbeit führt zum Schluss, dass die Abhängigkeit vor allem auf die Strukturiertheit der Vegetation zurückzuführen ist, welche nicht eindeutig mit der vorliegenden Spezies in Zusammenhang gebracht werden kann. Allerdings ist es möglich, dass unterschiedliche Spezies unterschiedliche Strukturen des Biomassevolumens aufweisen. Dennoch kann die Spezies als Parameter für die Erklärung des Rückstreuverhaltens als sekundär betrachtet werden. Watanabe et al. zeigen, dass die Rückstreuung stark von der Beleuchtungsrichtung abhängt und erklären dieses Verhalten mit der Struktur des aufgeforsteten Waldes, der in einem regelmässigen Raster gepflanzt wurde. Andererseits schliessen sie aber einen Unterschied der Astdichte (auch auf Grund der unterschiedlichen Spezies) nicht aus.

Saatchi et al. zeigen in [Saatchi 11b], dass die Genauigkeit der Schätzung von Vegetationsparametern auf Grund der Strukturiertheit für grossskalige Mittelungen zunimmt. Für kleinskalige Schätzungen zeigt sich der Einfluss der Strukturiertheit in einer Verschlechterung der Schätzung.

Ein Bild des Standes der Wissenschaft bezüglich semi-empirischer Schätzungen vermittelt LeToan et al. in [Le Toan 11]. Darin wird gezeigt, dass die Biomasseschätzung in verschiedenen Testgebieten prinzipiell auf ähnlichem Verhalten der Rückstreuung aufbaut. Es wird aber auch deutlich, dass die Unterschiede zwischen Gebieten und die Unsicherheiten der Messungen gross sind. Diese Feststellung bestätigt die Aktualität des ersten formulierten Zieles. Die Erklärung dieser Unsicherheiten und Unterschiede durch physikalisch plausible Mechanismen steht im Zentrum der Fragestellung.

Die SAR-Tomographie ist bis zu einem gewissen Grad in der Lage, die Waldstruktur dreidimensional darzustellen. So zeigen Dinh et al. in [Dinh 13], dass die Rückstreuung in tropischen Wäldern vornehmlich aus höheren Schichten des Vegetationsvolumens stammt. Dies zeigt deutlich, dass die Penetrationsfähigkeit des P-Bandes in Situationen mit sehr dichter Biomasse limitiert ist. Für die Untersuchung der in dieser Arbeit untersuchten temperierten bzw. borealen

Wäldern sind diese Erkenntnisse nicht direkt übertragbar. Frey zeigt in [Frey 10] anhand der Daten des Testgebietes Hinwil eine tomographische Auswertung. Das Testgebiet Krycklan wird durch Tebaldini et al. in [Tebaldini 10] tomographisch untersucht.

1.2.3 Simulation von *SAR*-Abbildungen

In diesem Abschnitt wird der Begriff Simulation für eine Modellierungstechnik verwendet, die zum Ziel hat, den *SAR*-typischen Abbildungsprozess einer gegebenen Objektgeometrie oder Objektanordnung rechnerisch nachzubilden. Als zu simulierende Objekte werden im Rahmen dieser Arbeit nur Bäume betrachtet.

Die Simulation der Abbildung von Objekten in *SAR*-Systemen ist durch verschiedene methodische Ansätze möglich. Grundlage aller Simulationen ist ein mehr oder weniger abstrahiertes Objektmodell. Ein hoher Abstraktionsgrad wird durch *matchstick models* erreicht, in welchen einzelne Bäume nur als einzelne Zylinder wiedergegeben werden [Charbonneau 10]. Geläufige Abstraktionen von Objekten allgemein sind die Diskretisierung der Objektgeometrie in homogene Volumenzellen oder Volumenschichten (*layer*) und die Nachzeichnung der Objektgeometrie durch geometrische Primitivobjekte (Scheiben, Kugeln, Zylinder, Kegel etc.), die als einzelne kohärente Streuzentren behandelt werden. Je nach verwendetem mathematischen Verfahren eignet sich der eine oder andere Ansatz besser.

Im Abschnitt 2.1 wird die Simulation der Interaktion von elektromagnetischen Wellen und Objekten ausführlicher beschrieben. Im folgenden Abschnitt wird nur ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben.

In [Lang 83] und [Karam 88] werden Verfahren vorgeschlagen, die die Rückstreuung von Vegetation als Rückstreuung einer Volumenschicht aus diskreten homogenen Partikeln (Zylindern) simulieren. Die beiden Arbeiten unterscheiden sich jedoch stark in den mathematischen Verfahren zur Lösung des Problems. Die Idee der Abstraktion des Vegetationsvolumens in Schichten mit homogenen Eigenschaften führte zur Entwicklung von Modellen, die gänzlich auf diskrete Objekte in der Simulation verzichten. Solche Modelle basieren auf der *radiative transfer (RT)*-Theorie. RT-Modelle abstrahieren das Simulationsszenario, indem die zu simulierende Objektgeometrie, z. B. eine Waldszene, in eine oder mehrere horizontale Schichten (*layer*) zerlegt wird, deren Eigenschaften statistisch bekannt sind, was in [Chauhan 91] und [Pan 05a] für die Simulation von Wäldern genutzt wird. Interaktionen zwischen den Schichten können berücksichtigt werden, weiter können RT-Modelle kohärent und vollständig polarimetrisch formuliert werden (*vector radiative*

transfer) [Tsang 01]. Die explizite Objektgeometrie fließt zwar in die Eigenschaften des *layers* ein, wird aber in der Simulation selbst nicht direkt berücksichtigt. Ulaby stellt in [Ulaby 90b] das *Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS)* vor, das in [McDonald 90] zur Simulation von Vegetation verwendet wird. Während das originale MIMICS nur *eine* Vegetationsschicht vorsah, wird in [Pan 05a] das Modell auf mehrere Schichten in *multi-MIMICS* erweitert und in [Pan 05b] um die Fähigkeit, auch bistatische Anordnungen zu simulieren, ergänzt. Karam stellt in [Karam 92] ein weiteres RT-basiertes Verfahren vor, das auch Interaktionen zwischen den einzelnen Schichten berücksichtigt. Das Modell wird in [Quiñones 04] verwendet, um die Rückstreuung im tropischen Regenwald zu untersuchen.

Mit dem Aufkommen von realitätsnahen 3D-Modellen von Bäumen [Yueh 92] [Leersnijder 92] [Castel 97] [Perttunen 98] [Lin 99] [Woodhouse 00] [Castel 01b] und [Castel 01a] wurde es möglich, die Geometrie der zu simulierenden Objekte zu berücksichtigen.

In [Thirion 04] stellt Thirion ein kohärentes und voll polarimetrisches Streumodell vor, das die realitätsnahen Baummodelle und die Abstraktion in Schichten vereint. Die Baummodelle werden dazu verwendet, die Eigenschaften homogener Volumenzellen zu definieren (also die *layer* horizontal zu unterteilen), womit die Simulation der Abbildung der Objektgeometrie ermöglicht wird. Das Modell findet eine Anwendung in [Thirion 05]. In [Thirion 06] wird gezeigt, dass das Simulationsverfahren auch für interferometrische Modellierungen anwendbar ist.

Andere Wege geht der Simulationsansatz, in welchem ein Objekt in einzelne Streuer diskretisiert und die Beiträge dieser einzelnen Streuer kohärent aufsummiert wird (Huygens-Fresnel-Prinzip) [Born 11]. Die Berechnung der Rückstreuung der diskreten Streuer ist durch verschiedene physikalische Approximationen wie der geometrischen oder physikalischen Optik möglich. In [Wohlers 80] wird gezeigt, wie die Abbildung eines Flugzeuges simuliert werden kann, indem die Oberfläche des Flugzeuges diskret abgetastet wird. Das Objekt wird also als Summe diskreter Einzelflächen mit individueller Orientierung der Flächennormalen zur simulierten Sensorposition dargestellt. Diese Idee eignet sich grundsätzlich auch zur Simulation von Geländeformen, wie in [Stiles 82] gezeigt wird. Konzeptionell wird dieser Ansatz auch verwendet, um *SAR*-Bilder radiometrisch zu normalisieren, indem die erwartete Rückstreuung eines Bildelementes als kohärente Summe einzelner Geländefacetten dargestellt wird, wie in [Small 11] gezeigt wird. Für die Simulation von Vegetation liegt die Diskretisierung der Objekte in zylindrische Einzelstreuer nahe, deren Rückstreuung exakt formuliert werden kann [Ulaby 90a] [Lin 95] [Stiles 96] [Lin 99] [Tsang 01] [Praks 03] [Disney 06], es sind aber auch andere geometrische Primitivobjekte mög-

lich, was in [Cameron 96] und [Kirscht 98] gezeigt wird sowie in der Simulationssoftware im Softwarepaket PolSARPro [Pottier 11].

Die Idee des diskretisierten Streuers ermöglicht neben der kohärenten Simulation weiter sogenannte *full wave*-Simulationen, die von den Maxwell-Gleichungen ausgehen und somit kohärent und voll polarimetrisch sind und als entscheidende Weiterentwicklung prinzipiell auch *Interaktionen* zwischen den Einzelstreuern berücksichtigen können. Da im KAPITEL 2.1 vertieft auf dieses Thema eingegangen wird, seien hier nur die zwei grundsätzlichen Ansätze erwähnt. Die *Finite Difference Time Domain Method (FDTD)* [Kane 66] [Taylor 69] [Umashankar 82] löst das Streuproblem, indem die durch die Maxwell-Gleichungen beschriebenen elektromagnetischen Felder für einzelne Zeitschritte in einem diskretisierten Raster berechnet werden. Eine Anwendung der FDTD zur Simulation von Objekten in *SAR*-Bildern findet sich in [Israelsson 00]. Neben der FDTD erfreut sich die *Method of Moments (MoM)* seit den 1980er Jahren einiger Beliebtheit und wurde in einigen Arbeiten zur Simulation von *SAR*-Rückstreuung verwendet [Albertsen 74] [Taflöve 83] [Lakhtakia 92] [Warnick 00] [Nguyen 06] [Sant’Anna 08]. Die MoM löst das Streuproblem, indem Rückstreuung und Interaktionen eines Streuers als kohärente Summe von interaktiven Einzelstreuern in einem anregenden elektromagnetischen Feld berechnet wird. Ein Spezialfall der MoM ist die *Discrete Dipole Approximation (DDA)* [Draine 94] [Yurkin 07a], die sich durch die verwendeten Lösungsalgorithmen und Randbedingungen von der klassischen MoM unterscheidet. Die klassische MoM löst das Streuproblem im Frequenzbereich, was die Einführung von Abtastfunktionen für die diskreten Dipolzellen notwendig macht, während die DDA das Streuproblem im Zeitbereich ohne eigentliche Abtastfunktionen löst (wobei der diskrete Dipol implizit einer Abtastung durch eine Rechtecksfunktion entspricht). Die DDA wurde in neuerer Zeit durch Yurkin et al. weiterentwickelt [Yurkin 11] indem vor allem durch Parallelisierung beschleunigte Berechnungsverfahren eingeführt wurden.

Ein Ziel dieser Arbeit ist, die DDA auf Wellenlängen im Mikrowellenspektrum zu übertragen. Die prinzipielle Anwendbarkeit für die Simulation der Rückstreuung von Bäumen im Mikrowellenspektrum wird in [Ding 03] und in [deBadereau 03] gezeigt, allerdings ohne die Methode als DDA zu bezeichnen. In [Zhao 12] findet sich eine Anwendung unter anderem der DDA, um die Streuung von Ästen im L-Band zu berechnen. In der Literatur finden sich aber bisher vor allem Anwendungen der DDA für Fragestellungen, die im optischen Wellenlängenbereich liegen. Die berücksichtigten Skalen weichen daher um Größenordnungen von den *SAR*-typischen Geometrien ab. Beispiele für Anwendungen sind die Simulation der optischen Rückstreuung von Zel-

len, Kristallen, Nanopartikeln oder Hydrometeoren [Draine 88], [Karlsson 05], [Surussavadee 06], [Yurkin 07b] und [Ungureanu 09].

1.2.4 Sicherstellung der Datenqualität

Die Sicherstellung der Datenqualität ist eine unverzichtbare Grundlage jeder wissenschaftlichen Arbeit. Negativ auf die Aussagekraft von Daten wirkt sich vor allem eine nicht ausreichende polarimetrische oder radiometrische Kalibration aus und das *SAR*-typische Bildrauschen (*speckle*).

Kalibration

Für *SAR*-Daten können grundsätzlich zwei Kalibrationsverfahren unterschieden werden:

1. interne Kalibration: Kontrolle und Korrektur des Sende- und Empfangssystems, dazu wird typischerweise das emittierte Signal direkt gemessen; eine stattgefunden Aufnahme wird für die Kalibration nicht benötigt. Für aktuelle Systeme kann angenommen werden, dass dieser Kalibrationsschritt im Rahmen der technischen Möglichkeiten als erfüllt angesehen werden kann. Die interne Kalibration wird daher hier nicht weiter behandelt.
2. externe Kalibration: die Kalibration geschieht *a posteriori*, d.h. nachdem der Abbildungsprozess stattgefunden hat.

Die äussere Kalibration wird weiter in radiometrische und polarimetrische Kalibration unterteilt. Die radiometrische Kalibration hat zum Ziel, die gemessene Leistung der Rückstreuung mit der ausgesendeten Leistung in Beziehung zu setzen. Ergebnis der radiometrischen Kalibration ist die Reflektanz der einzelnen Bildelemente. Die polarimetrische Kalibration hat zum Ziel, systembedingte Verfälschungen in den Beziehungen zwischen den polarimetrischen Kanälen zu korrigieren. Diese Beziehungen (Korrelationen) sind durch die Phase (*polarimetric phase*) zwischen einzelnen Kanälen charakterisiert. Neben der Phasenbeziehung kann durch eine äussere Kalibration das sogenannte Kanalübersprechen (*cross talk*) korrigiert werden [Sarabandi 90b].

Die äussere radiometrische, aber auch polarimetrische Kalibration ist möglich, wenn im abgebildeten Gebiet Referenzziele mit bekanntem Rückstreuverhalten abgebildet werden können. Üblicherweise werden zu diesem Zweck im Testgebiet Reflektoren positioniert, die über einen bekannten Rückstreuquerschnitt verfügen. Das Verfahren wird durch Barnes in [Barnes 86] und durch Gray in [Gray 90] beschrieben. Das Bestreben der folgenden Jahre war es, Algorithmen zu

finden, die für die polarimetrische Kalibration nicht mehr auf bekannte Referenzobjekte angewiesen sind. Für die absolute radiometrische Kalibration ist immer ein Referenzziel notwendig, wenn die Messcharakteristik des Systems nicht durch eine vorangegangene innere Kalibration festgestellt wurde. Die Kalibration wird generell vereinfacht, wenn in die äussere Kalibration «innere» Parameter wie z. B. die Antennencharakteristik einfließen [Touzi 93].

Van Zyl beschreibt in [vanZyl 90] ein Verfahren, das für die radiometrische Kalibration mindestens ein Referenzziel verwendet, die Kalibration des *cross talk* aber basierend alleine auf den Bilddaten durchführt. Ähnliche Verfahren, die entweder *cross talk* oder die polarimetrische Phase ohne Referenzziele kalibrieren, beschreiben Sarabandi in [Sarabandi 90a], Zebker in [Zebker 90] [Zebker 91b], Klein [Klein 92] und weitere Autoren in [Sheen 91], [Brock 92]. Freeman gibt in [Freeman 92a] einen Überblick über Kalibrationsmethoden und ihre Limitierungen.

Die Abhängigkeit von ausgebrachten Referenzzielen kann reduziert werden, wenn bekannte natürliche Ziele, v. a. *distributed targets* (meist Volumenstreuuer) verwendet werden können [Sarabandi 94] [Sarabandi 95].

Durch Annahmen über die grundsätzlichen Beziehungen der verschiedenen polarimetrischen Kanäle bei der Abbildung von natürlichen, symmetrischen Streuern und unter Verwendung aller vier polarimetrischen Kanäle ist eine Kalibration von *cross talk* und *polarimetric phase* auch basierend auf Bilddaten von natürlichen Szenen möglich. Die Algorithmen von Quegan [Quegan 94] und die Weiterentwicklung von Kimura [Kimura 04] sowie Ainsworth et al. [Ainsworth 06] können als *state of the art* bezeichnet werden: beide Algorithmen kalibrieren *cross talk* und *polarimetric phase* basierend auf den Bilddaten. Vorschläge zur Verifikation und Performanzanalysen einer erfolgten Kalibration finden sich in [Kim 01] und [Welsh 04].

Reduktion des Bildrauschens (*speckle*)

Das Bildrauschen (*speckle*) ist ein Phänomen, das typisch ist für Streuprozesse in kohärenter Strahlung. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Zahl von Einzelstreuern in einer Auflösungszelle gross ist. Die kohärente Addition der Beiträge dieser Einzelstreuere führt zu Interferenzerscheinungen, die sich als deutliche Helligkeitsunterschiede benachbarter Auflösungszellen (Rauschen) bemerkbar machen. Die Helligkeit eines Pixels ist demnach bis zu einem gewissen Grad mitbestimmt durch das zufällige Resultat kohärenter Überlagerungen. Diese Charakteristik zeigt sich beim Betrachten eines *SAR*-Bildes deutlich als «Sprenkelung» (*speckle*). Für die

Auswertung und Interpretation von *SAR*-Daten bedeutet das *speckle* eine Fehlerquelle, was in [Lee 99b] [Barber 12] thematisiert wird.

Als einfachste Massnahme gegen das *speckle* ist die Mittelung von benachbarten Pixeln. Unter Annahme eines grundsätzlich räumlich stabilen Streuprozesses in einer genügend eng begrenzten Nachbarschaft kann durch Mittelung das *speckle* reduziert werden, was manchmal als *multilooking* bezeichnet wird. Dieses Verfahren hat den Nachteil einer starken Reduzierung der geometrischen Auflösung. Frost [Frost 82], Khan [Kuan 87] und Lee [Lee 91] [Lee 99b] schlagen Verfahren vor, die die unmittelbare Nachbarschaft eines Pixels berücksichtigen und die *speckle*-Reduktion unter Beibehaltung der geometrischen Auflösung und weiterer Bildcharakteristika wie Kanten ermöglichen. In [Walessa 00] [Li 12] [Yun 12] [Espinoza Molina 12] werden neuere Verfahren gezeigt, mit welchen eine Reduktion des *speckle* unter bestmöglicher Erhaltung der Textur möglich wird. Das *despeckling* polarimetrischer Daten hat an die Bildstatistik die zusätzliche Anforderung, dass nicht nur die Nachbarschaftsbeziehungen, sondern auch die Beziehungen zwischen den polarimetrischen Kanälen erhalten bleiben sollen. Mit der *speckle*-Reduktion in polarimetrischen *SAR*-Daten beschäftigen sich die Arbeiten von López-Martínez [López-Martínez 03] [López-Martínez 05] [López-Martínez 11]. Die *speckle*-Reduktion in polarimetrisch-interferometrischen *SAR*-Daten wird in [Lee 03] untersucht.

In neueren Arbeiten wird das Konzept der Nachbarschaftsbeziehungen weiterentwickelt [Lu 10]. Verschiedene Bildtransformationen wie die *wavelet*-Transformation und verwandte Verfahren können das *despeckling* vereinfachen, was in [Argenti 12] [Chen 12] [Hou 12] [Parrilli 12] [Amirmazlaghani 12] gezeigt wird.

1.3 Physikalische Grundlagen

Für das Verständnis der in dieser Arbeit dargestellten Methodik werden im Folgenden die grundlegenden Begriffe sowie die grundsätzlichen Gedankenmodelle erklärt.

1.3.1 Maxwell-Gleichungen und die elektromagnetische Welle

Elektromagnetische Strahlung ist ein Phänomen, das sich einer eindeutigen bildhaften Beschreibung entzieht. Als Verbildlichung haben sich das Teilchen- und das Wellenmodell für elektromagnetische Strahlung eingebürgert. Keines der beiden Modelle ist allgemein dem anderen überlegen, je nach Fragestellung ist das eine oder das andere Modell besser geeignet, um die Sachver-

halte bildhaft darzustellen. Im Anwendungsgebiet der polarimetrischen *SAR*-Fernerkundung ist das Wellenmodell eine zweckmässige Beschreibung der verwendeten Strahlung, da auf Grund der vorliegenden Skalen auf eine quantenorientierte Beschreibung der Phänomene verzichtet werden kann.

Die Maxwell-Gleichungen zeigen die Verknüpfung von elektrischem Feld \vec{E} und magnetischem Feld \vec{B} . Die beiden Felder sind nicht voneinander trennbar, sie bedingen sich gegenseitig. Daher wird von elektromagnetischen Phänomenen und von elektromagnetischer Strahlung gesprochen. Das System der Maxwellgleichungen besteht aus vier Gleichungen, hier wiedergegeben für ein homogenes, isotropes Medium [Born 11]:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} + \sigma \vec{E} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

mit: \vec{E} = elektrische Feldstärke [V m^{-1}], \vec{B} = magnetische Flussdichte [T], \vec{D} = elektrische Flussdichte [A s m^{-2}], \vec{H} = magnetische Feldstärke [A m^{-1}], σ = elektrische Leitfähigkeit [$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$], ρ = Ladungsdichte [A s m^{-3}].

Es gelten weiter folgende Definitionen:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_e \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (1.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (1.6)$$

$$\chi_e = \epsilon_r - 1 \quad (1.7)$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (1.8)$$

mit ϵ_0 = elektrische Permittivität des Vakuums [$\text{A s V}^{-1} \text{m}^{-1}$], μ_0 = magnetische Feldkonstante (Vakuum) [N A^{-2}], χ_e = elektrische Suszeptibilität, χ_m = magnetische Suszeptibilität, ϵ_r = relative Permittivität, μ_r = relative magnetische Permeabilität.

Die Verknüpfung von elektrischem und magnetischem Feld kann im Wellenmodell anschaulich dargestellt werden. Eine elektromagnetische Welle (EM-Welle) wird aus zwei im dreidimen-

sionalen Raum orientierten harmonischen Schwingungen eines elektrischen und magnetischen Feldes gebildet. Die beiden Felder sind zueinander orthogonal und schwingen mit der selben Frequenz. Die Orthogonalität der Felder folgt direkt aus (1.1) und (1.2). EM-Wellen können mit Medien interagieren, indem sie im Medium durch Induktion Dipole erzeugen, die ihrerseits Quellen für elektrische und magnetische Felder sind. Die Induktion im Medium kann durch Verschiebung von freien Ladungen oder durch Ausrichtung von permanenten Dipolen stattfinden. Als Mass für die Induzierbarkeit des Mediums werden die elektrische Suszeptibilität χ_e und analog dazu magnetische Suszeptibilität χ_m eingeführt. Je grösser die Werte dieser Materialeigenschaften sind, desto einfacher können im Medium Induktionen stattfinden. Für nichtleitende Materialien liegt der Wert für die elektrische Suszeptibilität im für diese Arbeit relevanten Frequenzbereich in der Grössenordnung $0 \dots 10$, leitende und gut polarisierbare Materialien (z. B. Wasser) haben deutlich grössere Werte. Die magnetische Suszeptibilität liegt für diamagnetische und paramagnetische Stoffe zwischen $-10^{-5} \dots 1$, erreicht aber für ferromagnetische Metalle (z. B. Eisen) Grössenordnungen $> 10^4$.

1.3.2 Grundlagen der numerischen Simulation von Rückstreuprozessen

Die hier verkürzt wiedergegebenen Herleitungen stellen die zentrale Formulierung für die numerische Simulation von Rückstreuprozessen dar. Im ANHANG B.1 werden die einzelnen Schritte ausführlich dargestellt.

Die Darstellung der EM-Welle als harmonische Schwingung ermöglicht es, komplexe Zahlen für die mathematische Beschreibung zu verwenden. Die imaginäre Einheit $i = \sqrt{-1}$, die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ und die Zeit t bilden das Argument der Exponentialfunktion, so dass $\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{-i\omega t}$ bzw. $\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot e^{-i\omega t}$.

Nach diesem Schritt kann das System der Maxwellgleichungen in Form einer Wellengleichung mit Wellenzahl k formuliert werden [Born 11]:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k^2 \vec{E} = i\omega\mu_0 \vec{J} \quad (1.9)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1.10)$$

Die Stromdichte \bar{J} ist eine Quelle bezüglich des elektrischen Feldes. Die Wellengleichung wird durch die dyadische Green-Funktion des freien Raumes $\bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}')$ gelöst. Diese Funktion beschreibt das elektrische Feld an beliebigen Koordinaten \bar{r} ausserhalb einer infinitesimalen Quelle in \bar{r}' . Das abgestrahlte Feld einer nicht-infinitesimalen Quelle, die ein Raumvolumen einnimmt, entspricht der Faltung der Green-Funktion mit der Stromdichte \bar{J} im Volumen der Quelle. Dies führt zu folgendem Integralausdruck [Tsang 01]:

$$\bar{E}(\bar{r}) = i\omega\mu_0 \int \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') d\bar{r}' \quad (1.11)$$

Die aktive *SAR*-Fernerkundung beruht darauf, dass die ausgesendete EM-Welle im zu untersuchenden Objekt Ströme induziert, das Objekt polarisiert. So wird das Objekt selbst zur Quelle einer EM-Welle, die als Rückstreuung registriert werden kann. Da in dieser Arbeit nur der für die Fernerkundung relevante Fall betrachtet wird, kann die Stromdichte $\bar{J}(\bar{r}')$ durchwegs mit der Polarisierung durch eine einfallende EM-Welle gleichgesetzt werden. Wenn die Polarisierung durch eine einfallende EM-Welle bedingt ist, entspricht das Feld in (1.11) dem rückgestreuten Feld. Zu diesem Feld wird das einfallende (polarisierende) Feld $\bar{E}^{inc}(\bar{r})$ addiert, um das totale Feld $\bar{E}(\bar{r})$ zu erhalten. Unter Ausnutzung von:

$$\bar{J}(\bar{r}) = -i\omega\epsilon_0\chi_e(\bar{r})\bar{E}(\bar{r}) \quad (1.12)$$

folgt daraus die Volumenintegralgleichung [Tsang 01]:

$$\bar{E}(\bar{r}) = \bar{E}^{inc}(\bar{r}) + k^2 \int \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \chi_e(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') d\bar{r}' \quad (1.13)$$

$$k^2 = \omega^2\mu\epsilon_0 \quad (1.14)$$

Diese Gleichung zeigt direkt das Huygens-Fresnel-Prinzip. Gemäss diesem Prinzip [Born 11] kann die Reflexion modellhaft dargestellt werden, indem das streuende Objekt P in einzelne infinitesimale Einzelstreuer p_i zerlegt wird. Die einzelnen Streuer werden durch eine einfallende Welle polarisiert und streuen ihrerseits eine Welle zurück, indem sie zu Quellen von einzelnen Kugelwellen werden (vgl. ABB. 1.6). Beim Sensor wird demnach die kohärente Summe dieser Einzelstreuer

im Fernfeld registriert. Diese kohärente Summe ist ein dreidimensionales Interferenzmuster (vgl. ABB. 1.5), die am Sensor registrierte Amplitude ist also neben den Objekteigenschaften prinzipiell auch abhängig von der Sensor - Objektgeometrie. ABB. 1.6 ist weiter eine Verbildlichung der Grundidee des in dieser Arbeit verwendeten Streumodells, der *discrete dipole approximation* (DDA). Da der Ansatz direkt auf der Lösung der Maxwellgleichungen basiert, erlaubt er eine physikalisch vollständige Beschreibung der Streuung einer EM-Welle ausgehend von der Volumenintegralgleichung (1.13).

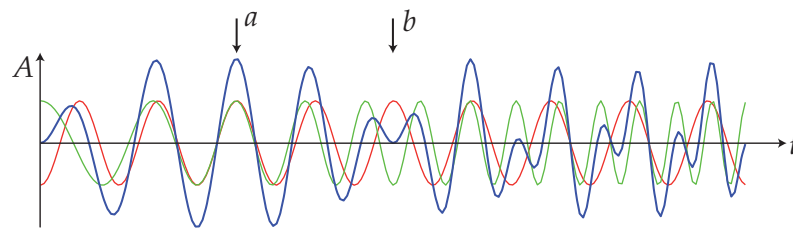


ABB. 1.5: Die Überlagerung (blau) zweier Wellen (rot und grün), in diesem Beispiel mit gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Frequenz, führt zu Interferenzerscheinungen. a: konstruktive Interferenz, b: destruktive Interferenz. [Born 11].

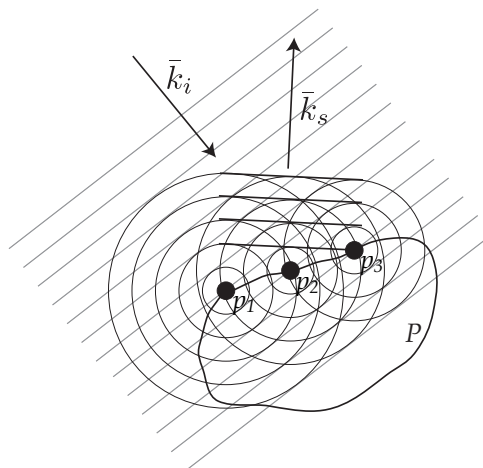


ABB. 1.6: Illustration des Huygen-Fresnel Prinzips. Die Streuung eines Objektes P , das von einer einfallenden elektromagnetischen Welle mit der Ausbreitungsrichtung \vec{k}_i getroffen wird, kann als kohärente Summe der Rückstreuung von Einzelstreuern $p_{1...3}$ angenähert werden. Die resultierende rückgestreute Wellenfront hat die Ausbreitungsrichtung \vec{k}_s . Nach [Born 11].

1.4 Die Abbildung mittels polarimetrischen SAR-Systemen

1.4.1 Geometrie

Die Geometrie der SAR-Abbildung wird in ABB. 1.7 verdeutlicht. Der SAR-Sensor bewegt sich auf einem im Allgemeinen nicht linearen Flugpfad. Die Linearisierung dieses Pfades oder die Linearisierung eines Teilstücks des Pfades definiert eine Koordinatenachse in einem kartesischen Koordinatensystem. Es ist üblich, die y -Achse mit dem linearisierten Flugpfad gleichzusetzen (auch als Azimut-Richtung bezeichnet). Die Höhe über Grund (oder über einem Referenzellipsoid oder Geoid) definiert die z -Achse. Die x -Achse entspricht der Entfernung vom auf die Referenzfläche projizierten Flugpfad (*ground range*).

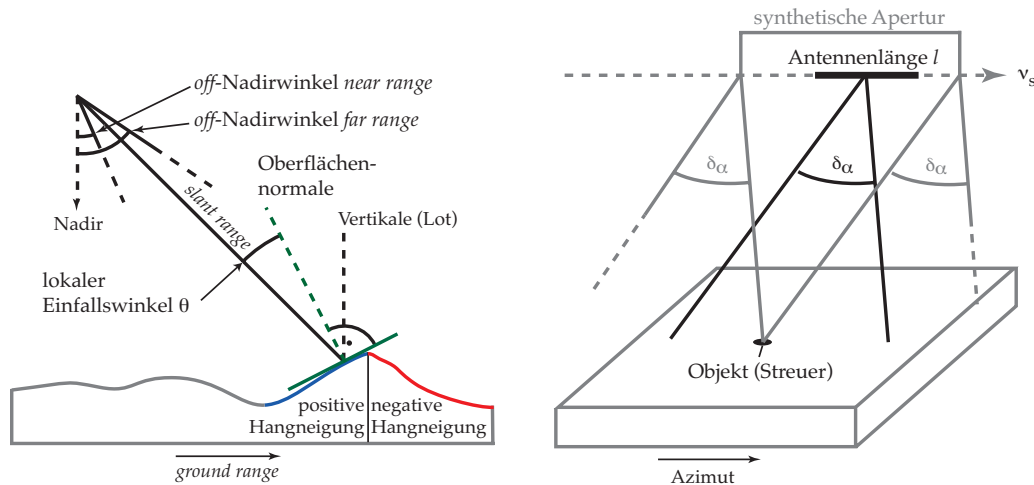


ABB. 1.7: Die Geometrie eines SAR-Systems. Links: range-Geometrie, rechts: Azimut-Geometrie. Mod. nach [Meier 89].

In diesem dreidimensionalen Koordinatensystem liegt die zweidimensionale Bildmatrix. In der Schrägsicht (*slant range*) liegt die Matrix in der durch den Flugpfad und der Blickrichtung der Antenne definierten Ebene. Die *ground range*-Geometrie entspricht einer Projektion der Schrägsicht-Bildmatrix auf die Referenzfläche.

Um die Polarisation des gesendeten bzw. empfangenen Signals zu beschreiben, wird im kartesischen Koordinatensystem mit den Einheitsvektoren ($\bar{e}_x, \bar{e}_y, \bar{e}_z$) ein weiteres kartesisches Koordinatensystem definiert, dessen Einheitsvektoren der Ausbreitungsrichtung der gesendeten

oder empfangenen Strahlung \bar{k} , der als vertikal bezeichneten Richtung \bar{v} und der horizontalen Richtung \bar{h} entsprechen. Die vertikale Polarisationsrichtung ist hierbei nicht identisch mit der z -Richtung des zu Grunde liegenden kartesischen Koordinatensystems.

Die geometrische Beschreibung von Rückstreuungsprozessen unterliegt zwei Konventionen, die im ANHANG B.2 ausführlicher dargestellt werden. Die *forward scattering alignment (FSA)*-Konvention definiert das Koordinatensystem abhängig von der Ausbreitungsrichtung der Welle. Wird der Pfad der durch den Sensor ausgesendeten und an einem Objekt zurückgestreuten Welle verfolgt, dreht sich das Koordinatensystem mit der Ausbreitungsrichtung der Welle nach der Rückstreuung.

Die *backscatter alignment (BSA)*-Konvention definiert das Koordinatensystem sensorbezogen. Das Koordinatensystem wird abhängig von der Sichtachse des Sensors definiert. Dies hat zur Folge, dass die ausgesendete Welle sich in Richtung der Koordinatenachse bewegt, die rückgestreute Welle aber sich gegen die Koordinatenachsenrichtung ausbreitet.

Die in dieser Arbeit gezeigte Simulation von SAR-Daten beruht auf diesen Koordinatensystem-Definitionen. Für die Datensimulation wird die FSA-Konvention verwendet.

1.4.2 SAR-Fokussierung

Eine Eigenschaft eines SAR-Systems ist die Möglichkeit, die Laufzeitmessung eines ausgesendeten und durch Objekte im Untersuchungsgebiet gestreuten Signals in ein Bild umzusetzen, das über eine in beiden Dimensionen konstante Auflösung verfügt. Zwei grundlegende Konzepte, die Pulskompression und die Apertursynthese, ermöglichen dieses Verfahren. In der Folge werden diese beiden Konzepte vereinfacht dargestellt, für ausführlichere Darstellung wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [Curlander 91], [Soumekh 99], [Born 11].

Die grundsätzliche Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems ist in ABB. 1.7 dargestellt. Vereinfacht verläuft der Abbildungsprozess eines SAR-Systems nach folgendem Muster:

- Der Sensor bewegt sich auf einem definierten Flugpfad (im einfachsten Fall auf einer Geraden).
- Mit einer definierten Frequenz (Pulsrepetitionsfrequenz) werden kurze Pulse im Mikrowellenspektrum ausgesendet. In voll polarimetrischen Systemen wechselt die Sendepolarisation von Puls zu Puls.

- In der Zeit bis zum Aussenden des nächsten Pulses wird ein definiertes Zeitfenster für den Empfang geöffnet, die gemessene Rückstreuung wird registriert. Bei polarimetrischen Systemen verläuft diese Messung der Rückstreuung unabhängig in zwei Kanälen (z.B. horizontale Empfangspolarisation und vertikale Empfangspolarisation).
- Die Messung der Rückstreuung eines Pulses erzeugt eine Spalte in der Rohdatenmatrix, wobei jede Zeile einem definierten Empfangszeitpunkt entspricht. Eine Spalte in der Rohdatenmatrix wird als *echo* bezeichnet.
- Wenn die Empfangsantenne über zwei Polarisationen verfügt, findet der Empfang im voll-polarimetrischen Betrieb gleichzeitig in zwei getrennten Kanälen statt. Durch die von *echo* zu *echo* abwechselnde Sendepolarisation können so vier Kombinationen der zwei Sendepolarisationen (z. B. horizontal und vertikal) und der Messung in zwei Empfangspolarisationen (z. B. auch horizontal und vertikal) entstehen. Im voll-polarimetrischen Fall können so vier Rohdatenmatrizen entstehen.

Wenn die Laufzeit eines Signals gemessen wird, das mit konstanter Frequenz gesendet wird, ist die geometrische Auflösung in der *range*-Richtung, also entlang der Ausbreitungsrichtung des Signals, direkt abhängig von der Länge des Signals. Die gestreuten Signale zweier Punktstreuer sind nur dann voneinander zu trennen, wenn die Punktstreuer um mehr als die Hälfte der Signaldauer T_p in *range* voneinander entfernt liegen. Dies würde bedeuten, dass ein nahezu unendlich kurzes Signal die bestmögliche Auflösung liefern könnte (Dirac-Puls), was praktisch nicht realisierbar ist. Die Lösung des Problems liegt in der Pulskompression: das Signal wird nicht mit konstanter Frequenz gesendet, sondern mit einer meist linear ansteigenden oder abfallenden Frequenz. Ein solches Signal wird als *chirp* bezeichnet. Die Länge des frequenzmodulierten Pulses (*chirp*) ist nicht mehr relevant für die maximal erreichbare Auflösung, da jeder Streuer im beleuchteten Gebiet den Signalverlauf des *chirps* zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt zum Empfänger zurückstreut. Die überlagerten Siganlbeiträge der einzelnen Streuer können voneinander getrennt werden, indem das Signal mit der *chirp*-Referenzfunktion korreliert wird. Die beste Auflösung in *range* ist somit gemäss des Nyquist-Shannon-Theorems nur noch Abhängig von der verwendeten Bandbreite der *chirp*-Referenzfunktion.

Der Öffnungswinkel δ_α der von einer *SAR*-Antenne ausgesendeten Strahlung ist abhängig von der Antennenlänge. Eine kurze Antenne (eine Antenne mit kleiner Apertur) hat einen grossen Öffnungswinkel, eine Antenne mit grosser Apertur einen kleinen. Erstrebenswert wäre also

eine möglichst lange Antenne, was rasch an praktische Grenzen stösst. Da die beste Auflösung abhängig vom Öffnungswinkel ist, verschlechtert sich die theoretisch mögliche geometrische Auflösung mit zunehmender Entfernung. Das Konzept der synthetischen Apertur ermöglicht es, eine entfernungsunabhängige hohe Auflösung mit praktisch realisierbaren Antennenlängen zu erreichen.

Dazu wird der Sensor auf einem bekannten Flugpfad mit bekannter Geschwindigkeit bewegt, die abzubildenden Streuer werden in Seitensicht durch einzelne Sendepulse (*echos*) beleuchtet. Die verwendete Antennenlänge ist dabei so gewählt, dass der resultierende Öffnungswinkel es ermöglicht, dass die Streuer während mehrerer *echos* beleuchtet werden und ein Signal zum Sensor zurückstreuen. Da sich die Streuerentfernungen zwischen zwei Echopositionen im Allgemeinen unterscheiden, durchläuft die Phase des gestreuten Signals einen charakteristischen Verlauf, der einer Frequenzverschiebung (Dopplerverschiebung) durch Annäherung oder Entfernung vom Streuer entspricht. Alle Signale eines Streuers bilden somit eine Funktion mit einer charakteristischen entfernungsunabhängigen Bandbreite. Durch Korrelation mit einem entsprechenden Referenzsignal kann der Azimut-Signalverlauf eines Streuers fokussiert werden. Die beste Auflösung ist wiederum gemäss des Nyquist-Shannon-Theorems nur abhängig von der entfernungsunabhängigen Azimut-Bandbreite. Für einen Streuer wird die Länge des Pfades, die der Sensor zwischen dem ersten und dem letzten beleuchtenden *echo* zurückgelegt hat, als synthetische Apertur bezeichnet. Die resultierende Auflösung für diesen Streuer entspricht der Auflösung die durch den Öffnungswinkel einer theoretischen Antenne mit Länge der synthetischen Apertur gegeben ist.

1.5 Fragestellung

Aus der Erkenntnis, dass tiefe Frequenzen vergleichsweise hohe Korrelationen zwischen Vegetationsparametern wie Biomasse und Rückstreuung aufweisen [Le Toan 92], folgt direkt die Begründung für die Wahl des P-Bandes. In dieser Arbeit werden ausschliesslich P-Band-Daten untersucht.

Die Korrelation zwischen Vegetationsparametern und Biomasse ist polarisationsabhängig [Hussin 91], daher wird versucht, den Mehrwert von voll polarimetrischen Daten auszuschöpfen.

Motiviert durch die Arbeiten von Le Toan et al. [Le Toan 92] [Le Toan 11] ergibt sich als grobe erste Zielformulierung für die vorliegende Arbeit folgendes: Die Arbeit untersucht den Zusammenhang zwischen gemessener voll polarimetrischer Rückstreuung im P-Band und Vege-

tationsparametern und erklärt die zu Grunde liegenden Faktoren und Mechanismen, die zum gemessenen Zusammenhang führen oder den Zusammenhang schmälern. Mögliche Korrekturen dieser Mechanismen werden aufgezeigt.

In Anknüpfung an die im vorangehenden Kapitel dargestellte Literatur ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Der semi-empirische Ansatz von [Ferrazzoli 92], [Beaudoin 94], [Rauste 94], [Israelsson 94], [Rignot 95], [Ferrazzoli 97], [Paloscia 99], [Sun 00], [Saatchi 00], [Watanabe 06], [Saatchi 07], [Sandberg 11] und [Soja 13] haben ermöglicht, den Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse quantitativ zu beschreiben. Nachteil des Ansatzes ist, dass die Parametrisierung für jedes Testgebiet individuell vorgenommen werden muss. Daraus ergibt sich die erste Fragestellung: **Ist es möglich, den Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse so zu beschreiben, dass die Parametrisierung aus Forstinventardaten und weiteren biophysikalischen Parametern abgeleitet werden kann?** Um die Fragestellung einzugrenzen, werden aus dieser Fragestellung zwei Teilfragen abgeleitet:
 - a) An die empirische Herangehensweise schliesst die erste Teilfrage an, indem Mechanismen gesucht werden, die eine in einem Testgebiet gefundene Parametrisierung erklären: **Welche biophysikalischen Parameter beeinflussen die Rückstreuung in den einzelnen Streumechanismen?**
 - b) Die Biomasseschätzung wird durch die Sättigung erschwert. In [Woodhouse 06], [Brolly 10] und [Brolly 12b] wird anhand von Modellüberlegungen postuliert, dass diese Sättigung durch die Änderung der Vegetationsstruktur in Abhängigkeit von der Einzelbaum-Biomasse erklärt werden kann (*thinning*). Die zweite Teilfrage knüpft an diese Überlegungen an und lautet: **Kann die in allen Streumechanismen festgestellte Sättigung durch die Ausdünnung (*thinning*) erklärt werden?**
2. In [Neumann 12] wird gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Dekompositionsparametern und Vegetationsparametern die Schätzung der Biomasse unterstützen kann. Die dritte Fragestellung der Arbeit weitet diese Feststellung aus: **Können Dekompositionsparameter gefunden werden, aus denen neben der Biomasse weitere Informationen über die Vegetationsstruktur abgeleitet werden können?**

3. Die letzte Fragestellung des ersten Teils betrifft die Datenerhebung von Forstinventurdaten:

Welche Vegetationsparameter sollten *in situ* erhoben werden, um die Schätzung weiterer Parameter mittels *SAR*-Fernerkundungsdaten zu unterstützen?

Die zweite Fragestellung der Arbeit betrifft die Simulation von *SAR*-Daten. Walddaten weisen eine grosse Streuung auf. Es ist nicht in allen Fällen abschätzbar, was mit der zu Grunde liegenden Struktur erklärt werden kann und welche Beiträge weitere, eventuell unbekannte Mechanismen haben. Dies motiviert die Verwendung von Streumodellen, denn in Modellen sind die unabhängigen Variablen weitgehend kontrollierbar. Da schon gezeigt wurde, dass bisher entweder komplexe Baummodelle in Verbindung mit physikalisch vereinfachten Formulierungen, als Beispiele [Pottier 11] und [Disney 06], oder komplexe physikalische Modelle mit vereinfachten Baummodellen oder aus komplexen Baummodellen abstrahierten Volumenzellen verwendet worden sind, als Beispiele [Israelsson 00] und [Thirion 06], versucht diese Arbeit einen Mittelweg. Es sollen wenig vereinfachte Baummodelle mittels wenig vereinfachten physikalischen Modellen simuliert werden. Das führt zu folgender Fragestellung:

5. Wie kann ein Streumodell so an die Bedürfnisse der polarimetrischen *SAR*-Fernerkundung angepasst werden, dass mit realistischem Rechenaufwand Datenprodukte simuliert werden können, die in ihrer Charakteristik der gemessenen Vegetationsrückstreuung weitgehend entsprechen?

Für die Beantwortung der Fragestellung werden simulierte Daten und mehrere P-Band-Datensätze von zwei Testgebieten, eines in Hinwil, Schweiz, und das andere in Krycklan, Schweden, verwendet. Nicht das operationelle Produkt steht im Vordergrund, sondern das Verständnis von methodischen Vorgehensweisen und die Beschreibung von physikalischen Mechanismen.

In dieser Arbeit kommen keine weiterführenden Techniken wie z.B. *SAR*-Tomographie [Frey 10] zum Einsatz. Quelle des Signals auch für die interferometrische oder tomographische Auswertung sind die dielektrischen Eigenschaften und die Geometrie des untersuchten Objektes. Wenn es gelingt, durch rein polarimetrische Datenverarbeitung grundlegende Mechanismen zu identifizieren, die die gemessene Rückstreuung erklären, sind diese Mechanismen auch in weiterführenden Verarbeitungstechniken wirksam. Im umgekehrten Fall muss das nicht zutreffen, durch weiterführende Verarbeitungstechniken identifizierte Mechanismen könnten sich auch als Artefakte erweisen. Die Beschränkung auf rein polarimetrische Datenverarbeitung folgt also aus dem Bestreben, eine grösstmögliche Allgemeinheit der Resultate zu erreichen.

1.6 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel der Arbeit werden nach einer Darstellung des aktuellen Forschungsstandes die mathematischen und physikalischen Grundlagen zur *SAR*-Abbildung, Polarimetrie und elektromagnetischer Modellierung gezeigt.

Das zweite Kapitel vertieft diese Grundlagen, indem die angewendete Methodik detailliert dargelegt wird.

Im dritten Teil werden die Resultate dargestellt und kommentiert. Im vierten Teil werden dies Resultate im Überblick dargestellt und diskutiert. Nach der daraus folgenden Beantwortung der Fragestellung schliesst die Arbeit mit einem Ausblick auf weitere Forschungsfragen.

In den Anhängen finden sich ein Abkürzungs- und ein Symbolverzeichnis sowie Ergänzungen zu den einzelnen Kapiteln.

2 Methoden

Die dieser Arbeit zu Grunde liegende Methodik wird in diesem Kapitel ausführlich dargelegt. Das Kapitel ist in fünf aufeinander aufbauende und sich ergänzende Teile gegliedert. Im ersten Teil wird dargestellt, wie sich mit Hilfe eines Streumodells Datenprodukte simulieren lassen, deren Eigenschaften *SAR*-Daten natürlicher Szenen gleichkommen. Dafür ist es notwendig, möglichst naturnahe Baummodelle so in einer simulierten Szene zu positionieren, dass das natürliche Wachstumsverhalten eines Waldes nachempfunden werden kann. Daher schliesst an die Darstellung der Simulationsmethodik ein Kapitel an, in dem erläutert wird, wie der zu simulierende Waldbestand aufgebaut wird. An diese Darstellung schliesst die Methodik für die Informationsgewinnung aus polarimetrischen *SAR*-Daten an, in dem die verwendeten polarimetrischen Dekompositionen erläutert werden. Diese drei Kapitel vermitteln die methodische Grundlage einerseits zur Simulation, andererseits zur Verarbeitung simulierter oder auf natürlichen Szenen basierender *SAR*-Daten. Im vierten Teil wird dargestellt, welche *SAR*-Daten, Zusatzdaten wie Forstinventurdaten und welche Testgebiete in dieser Arbeit Verwendung finden. Im fünften und letzten Teil wird als Synthese des Methodenkapitels ein Konzept vorgestellt, wie aufbauend auf der gezeigten Datenverarbeitung, mit Hilfe von simulierten Daten und *SAR*-fremden Datenerhebungen wie Forstinventurdaten, das erreicht werden kann, wofür Fernerkundungsdaten im Allgemeinen erhoben werden. Das Ziel ist es, aus der Distanz Parameter des Untersuchungsgegenstandes verlässlich zu schätzen.

2.1 Simulation von SAR-Daten

Die Modellierung von *SAR*-Daten orientiert sich am Vorgehen, das durch Soumekh in [Soumekh 99] vorgestellt wird. In dieser Arbeit wird dieses Konzept stark erweitert. Der hier vorgestellte Simulationsansatz beruht aber auf der Grundidee des *SAR*-Simulators nach Soumekh. Es wird versucht, aufbauend auf einfachen Konzepten die methodischen Schritte nachvollziehbar darzustellen, die zu einem Simulationsverfahren führen, mit dessen Hilfe möglichst «naturidentische» *SAR*-Daten aus kontrollierbaren Grundannahmen hergestellt werden können.

Der durch Soumekh in [Soumekh 99] vorgeschlagene *SAR*-Simulator beruht auf einfachen Grundannahmen:

- Die auf ein Objekt (*target*) fallende EM-Welle ist abhängig von der Schrägdistanz (*slant range*) zwischen Sender und *target*.
- Die einfallende EM-Welle entspricht der vor einer entfernungsabhängigen Zeit ausgesendeten EM-Welle am Sender.
- Das am Empfänger registrierte, gestreute Signal ist eine kohärente Addition von einzelnen Streuern.

Hier wird sichtbar, dass der Simulator auch auf dem schon in ABB. 1.6 gezeigten Huygens-Fresnel-Prinzip aufbaut, wenn auch in der einfachen Formulierung das Prinzip eher makroskopisch interpretiert wird. Der von Soumekh vorgeschlagene Simulator ist auf einige wenige Einzelstreuer ausgelegt, die in einer solchen Distanz zueinander angebracht werden, dass gegenseitige Interaktionen nicht von Bedeutung sind. Für die Simulation von Einzelbäumen ist dieser Ansatz zu wenig fein aufgelöst, was in der Folge korrigiert wird. Dennoch sind die oben vorgestellten einfachen Grundprinzipien auch für den Aufbau eines komplexeren *SAR*-Simulators wertvoll. So wird deutlich, dass die Zeit t die dominierende Variable ist. Die Variable t steht in der Folge für die Zeit, die neben den kartesischen Koordinaten der gesamten Simulation zu Grunde liegt. Die Zeit t wird für jeden simulierten Puls neu bei $t = 0$ gestartet und dann so lange mit einer gegebenen *sampling*-Frequenz schrittweise erhöht, bis die berechnete Rückstreuung aller Einzelstreuer vollständig beim Sensor registriert werden konnte.

Formal kann dieser einfache Simulator als Summierung des rückgestreuten Signals der einzelnen Streuer dargestellt werden. Jeder Einzelstreuer hat ein Rückstreuvermögen σ_i , welches das einfallenden Signal s^{inc} als Signal s^{scat} zurückstreut. Die Signale sind abhängig von der Zeit t , aber auch von der Lage des Sensors. Im Detail bezeichnen: $s_i^{scat}(t, u)$ das Signal des i -ten *target* im Zeitbereich, σ_i den Rückstreuquerschnitt des *target* mit Index i und $s^{inc}(t_{di})$ die auf das *target* fallende EM-Welle. Der Radialabstand (*slant range*) von Sender zu *target* ist mit ρ_i bezeichnet. Die Koordinate x_i bezeichnet die Entfernung des *target* in Schrägentfernung (*slant range, fast time*), y_i die Koordinate in Bewegungsrichtung des Sensors (*azimuth*) und u die *azimuth* oder *slow time*-Position des Sensors. Dies führt zu folgender Formulierung, die identisch ist mit der in [Soumekh 99]:

$$\varrho_i = \sqrt{(x_i)^2 + (y_i - u)^2} \quad (2.1)$$

$$t_{di} = \left\lceil t - \frac{2\varrho_i}{c} \right\rceil \quad (2.2)$$

$$s_i^{scat}(t, u) = \sum_i \sigma_i \cdot s^{inc}(t_{di}) \quad (2.3)$$

Mit der bis hierhin gezeigten Formulierung könnten schon Einzelobjekte aus nicht-interagierenden Punktstreuern zusammengesetzt werden. Für die Wiedergabe der Struktur eines Baumes ist dieses Verfahren noch zu grob. Auch fehlt in der Formulierung die Möglichkeit, das Signal auf eine bestimmte Sensorcharakteristik anzupassen.

Im Verlaufe der Entwicklung des *SAR*-Simulators hat sich weiter gezeigt, dass der komplexe Prozess der *SAR*-Abbildung in Teilschritte zerlegt werden kann. Diese Teilschritte können über Schnittstellen (Datenprodukte) miteinander in Beziehung treten. So wurde der Simulationsansatz auf einer modularen Architektur basierend aufgebaut. Die Modularität hat im Hinblick auf die Implementierung den Vorteil, dass einzelne Module unabhängig voneinander entwickelt und validiert werden können. Ausserdem erlaubt der Ansatz eine hohe Kontrolle über Simulationsvariablen, indem einzelne Module nach Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden können. In TAB. 2.1 sind die einzelnen Schritte der *SAR*-Datensimulation aufgeführt. Alle Module verbindet der selbe kartesische Raum und die selbe Zeit.

2.1.1 Systemmodell (Sender)

Der neu entwickelte *SAR*-Sensor beruht auf dem Sensormodell als erstem Modul. In diesem ersten Modul wird die auf einen beliebigen Koordinatenpunkt in ausreichender Entfernung vom Sender fallende EM-Welle $s^{inc}(t_{dn})$ berechnet. Mit ausreichender Entfernung ist eine Entfernung gemeint, die es erlaubt, die einfallende Welle als Fernfeld-Welle zu beschreiben. Im Gegensatz zum Algorithmus in [Soumekh 99] wird die einfallende Welle aber nicht als ebene Welle (*plane wave*) beschrieben, sondern als von einer Punktquelle in der Sensorposition ausgehend. Diese Änderung ist nicht zwingend notwendig, da die Unterschiede zwischen beiden Formulierungen für die betrachteten Entfernungen gering sind. Dennoch wird zu Gunsten der Realitätsnähe für das hier gezeigte Simulationsverfahren im Allgemeinen die Formulierung verwendet, die weniger Annahmen bzw. Vereinfachungen benötigt.

Modul	Parameter	Verbindung zum nächsten Modul
Sender (Sensormodell)	Eigenschaften des Sensors, insbesondere Frequenz, Bandbreite, Pulslänge, Antennenachse und Flugpfad	Ausgesendetes Feld mit Frequenzmodulation (<i>chirp</i>).
Ausbreitung (zum Sender)	Abschwächung des Signals, Berücksichtigung von atmosphärischen Effekten sowie Bodeninteraktionen	Feld an der Position eines beliebigen Einzelstreuers
Objektmodell	Diskretisierung des Objektmodells in Einzelstreuer, Objekteigenschaften (z. B. Holzfeuchtigkeit)	Position der Einzelstreuer mit ihren dielektrischen Eigenschaften
Objektinteraktion	Aus einfallendem Feld und den Eigenschaften der diskreten Einzelstreuer wird die Polarisierung der Einzelstreuer berechnet, die die Quellen für das rückgestreute Feld bilden	Polarisierung der diskreten Streuer
Ausbreitung (zum Empfänger)	Berücksichtigung der Bodeninteraktionen sowie atmosphärischer Effekte und Signalabschwächung	gestreutes elektrisches Feld
Empfänger (Sensormodell)	Berücksichtigung der Empfängerposition und Demodulation des Signals	simulierte Rohdaten in den einzelnen polarimetrischen Kanälen
Prozessierung	Die simulierten Daten werden zum <i>single look complex (SLC)</i> weiterverarbeitet	simuliertes SAR-Bild (<i>SLC</i>)

TAB. 2.1: Teilschritte der Simulation

Da die zu simulierenden Objekte dreidimensional und nicht reine Punktquellen sind, wird das von Soumekh vorgeschlagene zweidimensionale Simulationsszenario auf drei Dimensionen erweitert. Um die Simulation voll polarimetrisch durchführen zu können, werden alle Größen ab jetzt vektoriell oder als Tensoren geschrieben. Die Richtungsvektoren des kartesischen Koordinatensystems sind der Einfachheit halber ausgehend von der Sensorbewegung und von der Szenengeometrie wie folgt definiert: \bar{e}_x - und \bar{e}_y sind parallel zum Boden (horizontal), \bar{e}_z liegt lotrecht auf der Bodenebene (vertikal). Der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems wird in der Szenenmitte festgelegt. Ein *target* befindet sich an den Koordinaten $\bar{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, der Sensor an $\bar{r}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$. Es wird die *FSA*-Konvention verwendet, wobei Indizes s sensorbezogene Koordinaten bezeichnen, Indizes i *target*-Koordinaten. In dieser vektoriellen Darstellung wird der Rückstreuquerschnitt ebenfalls als 3×3 -Tensor $\bar{\sigma}$ geschrieben. Dieser Tensor gleicht der

noch in der Folge erläuterten Streumatrix, mit dem Unterschied, dass der Vektorraum durch die kartesischen Einheitsvektoren gebildet wird und nicht durch die Basispolarisationen. Die Zeit t ist die Simulationsvariable, die allen Modulen zu Grunde liegt.

$$\bar{s}_i(t, \bar{r}_s) = \sum_i \bar{\sigma}_i \cdot \bar{s}^{inc}(t_{di}) \quad (2.4)$$

$$t_{di} = \left[t - \frac{2\varrho_i}{c} \right] \quad (2.5)$$

$$\varrho_i = \sqrt{(x_i - x_s(t))^2 + (y_i - y_s(t))^2 + (z_i - z_s(t))^2} \quad (2.6)$$

Unter Annahme eines linearen Flugpfades mit konstanter Höhe kann das Modell vereinfacht werden, indem die szenenabhängigen Konstanten x_0 bzw. z_0 eingeführt werden und die momentane Position des Sensors auf dem Flugpfad als u geschrieben wird. Die Konstanten x_0 und z_0 werden durch die beabsichtigte Aufnahmegeometrie aus Flughöhe und *off Nadir*-Winkel bestimmt. Mit diesen vereinfachenden Annahmen folgt:

$$\varrho_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - u)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (2.7)$$

Ohne diese Vereinfachung ist es auch möglich, mit dem hier gezeigten *SAR*-Simulator beliebige Fluggeometrien (Kreisflüge etc.) zu simulieren.

Die vom Sender ausgesendete EM-Welle ist für *SAR*-Aufnahmen frequenzmoduliert und zeitbeschränkt (*chirp*). In diesem Schritt wird das Modell nach Soumekh dadurch erweitert, dass für die Zwei-Weg-Laufzeit t_d neu die Ein-Weg-Zeit τ verwendet wird. Nur so ist es möglich, für alle individuellen Streuer das zu einer bestimmten Zeit eintreffende Signal simultan zu betrachten. Diese Gleichzeitigkeit ist für die Berechnung der Interaktionen von Streuern entscheidend. Soumekh umgeht dieses Problem, indem er Interaktionen vernachlässigt und so die Zweiwegzeit als Zeitvariable verwenden kann. Mit der Ein-Weg-Zeit resultiert eine von der Formulierung nach Soumekh abweichende Darstellung, das einfallende direkte (d.h. ohne Bodeninteraktionen) Feld $\bar{s}_{0i}^{inc}(t, u)$ für einen Punktstreuer an Position \bar{r}_i ist in vektorieller Darstellung gegeben durch:

$$\bar{s}_{0_i}^{\text{inc}}(t, u) = \bar{p} \cdot a(\tau_i) \cdot C(\tau_i) \cdot \kappa(\tau_i) \quad (2.8)$$

$$\tau_i = t - \varrho_i/c \quad (2.9)$$

$$C(\tau_i) = e^{-i(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}}\tau_i)\tau_i} \quad (2.10)$$

$$\kappa(\tau_i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \tau_i \in [0, T_p] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

$a(\tau_i)$: Amplitudenfaktor [dimensionslos]

\bar{p} : Sendepolarisation, entspricht \bar{h} oder \bar{v}

$\tau_i = t - \varrho_i/c$: Sendezeit oder Einwegzeit [s]

$\alpha_{\text{chirp}} = \pi \cdot B_{fm}/T_p$: *chirp*-Rate [s^{-2}]

T_p : Pulslänge [s]

B_{fm} : *chirp*-Bandbreite [Hz]

f_c : Mittenfrequenz [Hz]

$\omega_c = 2\pi f_c$: Mitten-Kreisfrequenz [s^{-1}]

$\omega_{cm} = \omega_c - \alpha_{\text{chirp}} \cdot T_p$: modifizierte Kreisfrequenz [s^{-1}]

Die Sendeantenne strahlt die Leistung nicht isotrop ab, sondern gerichtet. Dies führt auf dem Boden zu einem zweidimensionalen Antennendiagramm, das im einfachsten theoretischen Fall als ein Diagramm einer Stabantenne mit Länge l_{Antenne} beschrieben werden kann. Das Antennendiagramm ist frequenzabhängig, was durch die Kreiswellenzahl $k = \omega/c$ ausgedrückt wird. Die Abhängigkeit von der Position relativ zum Sensor fließt durch die Verschiebung des *targets* in Azimut-Richtung gegenüber der Sichtachse der Antenne du_i ein. Das Antennendiagramm wird beschrieben als [Soumekh 99]:

$$\Gamma^{\text{transmit}}(\bar{r}_i, u) = \text{sinc}\left(\frac{\omega/c \cdot l_{\text{Antenne}} \cdot du_i}{2\varrho_i}\right) \quad (2.13)$$

Dieser skalare Wert wird mit dem bisher berechneten Feldvektor multipliziert:

$$\bar{s}_{0_i}^{\text{inc}}(t, u) = \bar{p} \cdot a(\tau_i) \cdot C(\tau_i) \cdot \kappa(\tau_i) \cdot \Gamma_i^{\text{transmit}}(\bar{r}_i, u) \quad (2.14)$$

Was bis hierhin erreicht wird, ist die vektorielle Darstellung des direkt einfallenden Feldes (*chirp*), für beliebige Punkte in der simulierten Szene für beliebige Zeitpunkte. Als nächster Schritt wird die Ausbreitung bis hin zum Objekt mit möglichen Bodeninteraktionen berücksichtigt.

2.1.2 Ausbreitung bis zum Objekt

Freiraumdämpfung

Die Ausbreitung der EM-Welle vom Sender bis zum i -ten Objekt unterliegt der Freiraumdämpfung (*free space loss*). Die Leistungsdichte P^{sender} der ausgesendeten EM-Welle nimmt mit zunehmendem Abstand ab, so dass auf das Objekt die Leistungsdichte P_i^{inc} einfällt. Für einen isotropen Strahler entspricht die Leistungsabnahme in Entfernung ϱ_i der Grösse der Kugelschale mit Radius ϱ_i , was zu einem Faktor $1/4\pi \cdot \varrho_i^2$ führt. Diese Annahme gilt auch für die von einer nicht-isotropen Antenne abgestrahlten Leistung im Fernfeld, wenn der Antennengewinn separat berücksichtigt wird (siehe vorhergehender Abschnitt). Die Freiraumdämpfung des Weges vom Sender bis zum Streuer fliesst in den Amplitudenfaktor des bisher berechneten elektrischen Feldes s_0^{inc} ein:

$$P_i^{\text{inc}} = P^{\text{sender}} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varrho_i^2} \quad (2.15)$$

$$\bar{s}_{0_i}^{\text{inc}}(t, u) = \bar{p} \cdot \frac{a(\tau_i)}{\sqrt{4\pi \cdot \varrho_i^2}} \cdot C(\tau_i) \cdot \kappa(\tau_i) \cdot \Gamma_i^{\text{transmit}}(\bar{r}_i, u) \quad (2.16)$$

Wenn beabsichtigt wird, PolSAR-Daten von satellitengetragenen Sensoren zu simulieren, können insbesondere für tiefe Frequenzen atmosphärische Effekte nicht mehr vernachlässigt werden. Für weiterführende Information bezüglich atmosphärischer Effekte wird auf [Rignot 00], [Hanssen 01], [Freeman 04], [Jehle 08] und [Jehle 09] verwiesen. Auch wenn in dieser Arbeit nur flugzeuggestützte Szenarien simuliert werden, wurde dennoch im Hinblick auf zukünftige *spaceborne*-Missionen im P-Band (z. B. die BIOMASS-Mission [Le Toan 11]) in den hier vorgestellten SAR-Simulator die Berücksichtigung ionosphärischer Effekte integriert. Die Berücksichtigung der ionosphärischen Effekte im SAR-Simulator wird im ANHANG C.1 gezeigt. Auf eine Berücksichti-

gung der Dämpfung in der Troposphäre wurde verzichtet, da diese in den betrachteten Frequenzen P- und L-Band wenig ins Gewicht fällt und für alle polarimetrischen Kanäle weitgehend identisch ist.

Bodeninteraktion

Interaktionen zwischen dem Boden und einem Objekt sind eine wichtige Fragestellung in der SAR-Polarimetrie. In der vorliegenden Arbeit werden diese Effekte in der Simulation wie folgt berücksichtigt:

1. Die Koordinate $z = 0$ entspricht einer reflektiven Ebene, deren relative Permittivität frei gewählt werden kann. Streuer, die sich über dieser Ebene befinden, zeigen potentiell *multi path*-Erscheinungen.
2. Folgende Interaktionswege werden simuliert (Abb. 2.1): Sensor - *target* - Sensor (STS), Sensor - Boden - *target* - Sensor (SBTS), Sensor - *target* - Boden - Sensor (STBS), Sensor - Boden - *target* - Boden - Sensor (SBTBS). Die Reflexionswege SBTS und STBS haben die selbe *range*-Distanz und sind somit im fokussierten Bild nicht zu unterscheiden. Reflexionswege höherer Ordnung werden nicht berücksichtigt. Diese Einschränkung ist für die beabsichtigte Simulation von tiefen Frequenzen insofern zulässig, dass der Mehrwert durch Reflexionen höherer Ordnungen als gering anzusehen ist. Die Behandlung der Bodeninteraktionen in dieser Weise geht auf [Durdin 89] zurück und findet sich im Kontext der Simulation in [Thirion 05] und [Disney 06].

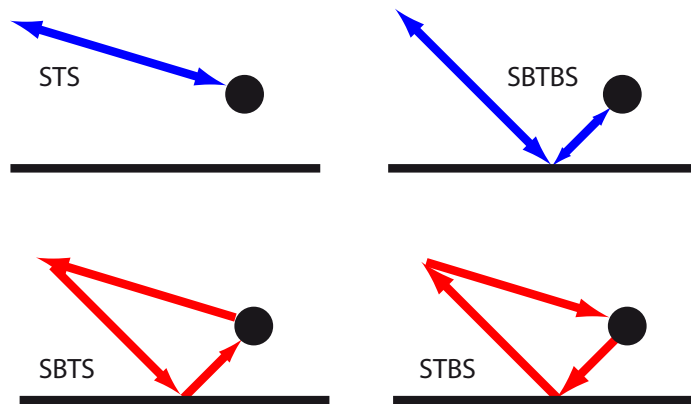


ABB. 2.1: Die vier in die Simulation integrierten Interaktionswege.

3. Die Reflektivität des Bodens ist polarisationsabhängig durch zwei komplexe Reflexionskoeffizienten:

$$r_{\parallel} = \frac{(k_{z1} - k_{z2})}{(k_{z1} + k_{z2})} \quad (2.17)$$

$$r_{\perp} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{ground}} \cdot k_{z1} - \epsilon_0 \cdot k_{z2}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{ground}} \cdot k_{z1} + \epsilon_0 \cdot k_{z2}} \quad (2.18)$$

Die senkrechte Komponente (z -Komponente) des Wellen-Ausbreitungsvektors in Medium 1 (Freiraum) wird mit k_{z1} bezeichnet, k_{z2} beschreibt die senkrechte Komponente des Wellen-Ausbreitungsvektors in Medium 2 (Boden) mit relativer Permittivität ϵ_{ground} .

Der Koeffizient r_{\parallel} beschreibt die Reflexion der horizontalen Komponenten des einfallenden elektrischen Feldes, r_{\perp} die Reflexion der transversalen (vertikalen) Komponenten.

Nach [Disney 06] können diese Reflexionskoeffizienten in ihrem Wert reduziert werden, um der Bodenrauigkeit Rechnung zu tragen. Dazu werden die Reflexionskoeffizienten mit einem von der Wellenzahl k , der Bodenrauigkeit s_{rough} = Standardabweichung der Oberfläche und dem lokalen Einfallswinkel θ_i abhängigen Faktor r_{corr} multipliziert, der die Reflektivität des Bodens für nicht-senkrechte Einfallswinkel zunehmend abschwächt:

$$r_{\text{corr}} = e^{-2(k \cdot s_{\text{rough}} \sin(\theta_i))} \quad (2.19)$$

Die Reflexion am Boden kann in Tensorform $\bar{\bar{r}}$ geschrieben werden, wenn davon ausgegangen wird, dass die horizontale Polarisation parallel zur y -Achse liegt:

$$\bar{\bar{r}}(\theta'_i) = \begin{bmatrix} r_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & r_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & r_{\perp} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

mit:

$$r_{\parallel} = \frac{\sin \theta'_i - \sqrt{\epsilon_{r_{\text{ground}}} - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta'_i + \sqrt{\epsilon_{r_{\text{ground}}} - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.21)$$

$$r_{\perp} = \frac{\epsilon_{r_{\text{ground}}} \sin \theta'_i - \sqrt{\epsilon_{r_{\text{ground}}} - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_{r_{\text{ground}}} \sin \theta'_i + \sqrt{\epsilon_{r_{\text{ground}}} - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.22)$$

θ'_i = lokaler Einfallswinkel im Reflexionspunkt

Um den lokalen Einfallswinkel im Reflexionspunkt θ'_i zu erhalten, wird das i -te *target* an der xy -Ebene gespiegelt. Das gespiegelte *target* hat die Koordinate $\vec{r}'_i = [x_i, y_i, -z_i]^T$ und eine *slant range*-Distanz $\varrho'_i = |\vec{r}'_i - \vec{r}_s|$. Der lokale Einfallswinkel ergibt sich aus dem Skalarprodukt des Richtungsvektors der z -Achse mit dem Richtungsvektor von der Sensorposition bis zum gespiegelten *target*:

$$\sin \theta'_i = \frac{(\vec{r}'_i - \vec{r}_s) \cdot \vec{e}_z}{\varrho'_i} \quad (2.23)$$

Das auf ein *target* fallende Feld $\vec{s}_i^{\text{inc}}(t, u)$ ist also im Allgemeinen eine Überlagerung der direkt einfallenden EM-Welle $\vec{s}_{i_0}^{\text{inc}}(t, u)$ und der am Boden reflektierten $\vec{s}_{i_{\text{refl}}}^{\text{inc}}(t, u)$. Auf Grund der verlängerten Laufzeit des reflektierten Strahlungsgangs hat die reflektierte Komponente des einfallenden Feldes $\vec{s}_{i_{\text{refl}}}^{\text{inc}}(t, u)$ eine Sendezeit $\tau'_i = t - \rho'_i/c$, die sich von der des direkten Signals unterscheidet. Das momentan auf ein *target* einfallende Feld ist also die Überlagerung zweier Wellen mit unterschiedlicher momentaner Frequenz:

$$\vec{s}_i^{\text{inc}}(t, u) = \vec{s}_{i_0}^{\text{inc}}(t, u) + \vec{s}_{i_{\text{refl}}}^{\text{inc}}(t, u) \quad (2.24)$$

Das direkte Signal $\vec{s}_{i_0}^{\text{inc}}(t, u)$ bzw. am Boden reflektierte Signal $\vec{s}_{i_{\text{refl}}}^{\text{inc}}(t, u)$ werden beschrieben durch:

$$\begin{aligned}\bar{s}_{i0}^{\text{inc}}(t, u) &= a(\tau_i) \cdot \bar{p} \cdot \kappa(\tau_i) \cdot \Gamma_t^i(\bar{r}_i, u) \cdot \\ &\quad e^{i(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}} \tau_i) \tau_i}\end{aligned}\tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}\bar{s}_{i\text{refl}}^{\text{inc}}(t, u) &= \bar{r}(\theta'_i) \cdot a(\tau'_i) \cdot \bar{p} \cdot \kappa(\tau'_i) \cdot \Gamma^{\text{transmit}}(\bar{r}'_i, u) \cdot \\ &\quad e^{i(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}} \tau'_i) \tau'_i}\end{aligned}\tag{2.26}$$

2.1.3 Objektinteraktion

Das komplexe physikalische Problem der Interaktion zwischen EM-Wellen und Materie kann auf verschiedene Weise formuliert und gelöst werden. In dieser Arbeit wird die Anwendung der *discrete dipole approximation (DDA)* für die Simulation der elektromagnetischen Streuung diskutiert. Wenn nicht abweichend erwähnt, folgt die Theorie [Draine 94], [Tsang 01] und [Yurkin 07a].

Die Wahl der DDA als Simulationsmethode für diese Arbeit erfolgte nach Prüfung der Vor- und Nachteile anderer Simulationsansätze. Da die Rückstreuung im P-Band verschiedene Streumechanismen zeigt, die direkt mit der Struktur von Einzelbäumen in Verbindung gebracht werden können, fiel die Wahl auf ein möglichst realitätsnahes architektonisches Baummodell, das aus einzelnen zylindrischen Segmenten zusammengesetzt ist. Um die polarimetrischen Eigenschaften adäquat zu simulieren, wurde nicht eine kohärente Modellformulierung basierend auf einzelnen Zylindern gewählt, sondern die Entscheidung fiel auf eine *full wave*-Formulierung. Dabei werden auch Interaktionen zwischen den Einzelstreuern berücksichtigt.

Die *full wave*-Modelle stellen hohe Anforderungen an die verfügbare Rechenleistung. Dies ist der Grund, weshalb in der Literatur in Verbindung mit dem *full wave*-Ansatz nur stark abstrahierte Baummodelle aus einzelnen Segmenten eingesetzt wurden. Als Beispiel dieser Vereinfachung sei die Arbeit von Israelsson et al. [Israelsson 00] erwähnt. Dort konnte gezeigt werden, dass stark vereinfachte Baummodelle für die Simulation der Rückstreuung im VHF-Band in Verbindung mit der FDTD-Methode verwertbare Resultate liefern. Die Abstraktion erweist sich im tieffrequenten VHF-Band als möglich, da im hochfrequenten P-Band im Gegensatz zum VHF-Band auch feinere Strukturen die Rückstreuung beeinflussen, was sich deutlich in der vorhandenen Volumenstreuung zeigt, wurde ein Modellierungsansatz gesucht, der komplexe Strukturen berücksichtigen kann. Komplexere Strukturen eines Baummodells wären mit der FDTD-Methodik auch simulierbar, die Methodik bedingt aber für feine Strukturen ein sehr feines räumliches Simulationsraster, was die Anzahl benötigter Rechenschritte sehr stark erhöht. Aus-

serdem müssen bei der FDTD-Methodik Randbedingungen für den simulierten Raum definiert werden, da anderenfalls unerwünschte Reflexionen an Grenzflächen auftreten, was die Flexibilität der Methode ebenfalls einschränkt, wenn grössere Waldbestände simuliert werden sollen.

Gegen *full wave*-Verfahren, die mittels Volumenzellen die Komplexität und somit den Bedarf an Rechenleistung reduzieren, sprach das Bestreben, auch räumlich kleinskalige Strukturen erfassen zu können, da gerade solchen Strukturen in der Literatur das Potential zugestanden wird, die Rückstreuung auch in tieferen Frequenzen zu beeinflussen [Imhoff 95a]. Feine Strukturen führen zu kleinen Volumenzellen, was wiederum eine sehr grosse Zahl an Volumenelementen notwendig macht und somit mit diesem Ansatz keine Reduktion der Rechenleistung erreicht werden kann.

Die MoM als verbleibender Simulationsansatz ermöglicht die Simulation komplexer Modelle, allerdings muss in der klassischen Formulierung der MoM im Frequenzbereich der gesamte Raum in kubische Elementarzellen diskretisiert werden. Wenn feine Strukturen wiedergegeben werden sollen, müssen diese Zellen sehr klein sein, was die Anforderungen an die Rechenkapazität stark erhöht. Dies umgeht die DDA als Spezialfall der MoM, indem in der Formulierung nach Tsang et al. [Tsang 01] im Zeitbereich operiert und nur die Elemente berücksichtigt werden müssen, die vom Modell her gegeben sind. Ausserdem werden von Beginn an zylindrische Elemente zugelassen, was die Übernahme eines architektonischen Baummodells stark vereinfacht. Die DDA ist durch die Formulierung im Zeitbereich nicht auf Randbedingungen angewiesen. Nachteil der Formulierung im Zeitbereich ist der Verzicht auf die Möglichkeit, die benötigten Gleichungen durch stark beschleunigte Operationen im Frequenzbereich zu lösen. Die bestehende Formulierung im Zeitbereich ist nur für konstante Frequenzen anwendbar.

Daher wird in dieser Arbeit die Formulierung der DDA an frequenzmodulierte *SAR*-Signale angepasst. Ein architektonisches und im Vergleich zu den in der Literatur bekannten Modellen komplexeres Baummodell wird in die Simulation übernommen. An die Simulation wird der Anspruch erhoben, direkt Produkte auszugeben, die realen *SAR*-Datenprodukte entsprechen. Dies erleichtert die weitere Verarbeitung und ermöglicht den direkten Vergleich zwischen simulierten Daten und *in natura* erfolgten *SAR*-Messungen.

Von der Simulation wird im Vergleich zur Auswertung von bestehenden *SAR*-Daten erwartet, dass Vegetationsstrukturparameter und weitere biophysikalische Parameter wie Holzfeuchtigkeit und Bodenfeuchtigkeit kontrolliert verändert werden können und direkt die Auswirkung auf die Rückstreuung beobachtet werden kann. Die Simulation wird in der vorliegenden Arbeit nicht dafür verwendet, um eine Parameterinversion zu ermöglichen. Gegen diesen Ansatz spricht der

noch experimentelle Charakter des Simulationsansatzes, der in einem ersten Schritt dem Vergleich mit *in natura* erhobenen *SAR*-Daten unterworfen wird. Erst wenn die Vergleichbarkeit gegeben ist, kann in einem zweiten Schritt durch systematische Veränderung aller verfügbaren Simulationsparameter eine Art *look up*-Tabelle erstellt werden, welche die Parameterinversion aus *SAR*-Daten unterstützt. Dieser zweite Schritt sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit.

Die Anpassung der *discrete dipole approximation* (DDA)

Im folgenden Abschnitt wird auf die Berechnung der Rückstreuung eines individuellen Volumenelements unter Verwendung der DDA eingegangen. Es werden notwendige Anpassungen vorgestellt, die gemacht werden müssen, wenn die Methode zur Simulation von frequenzmodulierten *SAR*-Signalen verwendet werden soll. Für eine detaillierte mathematische Herleitung sowie eine allgemeine Methodenkritik sei auf [Hoekstra 93], [Draine 94], [Tsang 01], [Warnick 04] und [Yurkin 07a] verwiesen.

Ausgegangen wird vom Volumenintegral (1.13), das direkt aus den Maxwell-Gleichungen hergeleitet wird. Das rückstreuende Objekt entspricht einem Volumen, das in homogene Volumenelemente zerlegt werden kann. Diese Volumenelemente bilden die diskreten Dipole. Diese haben eine in sich homogene Permittivität ϵ_r . Die Homogenität innerhalb eines Volumenelementes ist eine Prämisse der DDA. Das Gesamtvolumen muss nicht über eine homogene relative Permittivität ϵ_r (bzw. elektrische Suszeptibilität $\chi_e = \epsilon_r - 1$) verfügen, die Homogenität betrifft nur die diskreten Volumenelemente. Die Volumenelemente haben eine verschwindende magnetische Suszeptibilität χ_m .

Die Herleitung der folgenden Grundgleichung der DDA wird im ANHANG C.2 ausführlich dargestellt. Das grundlegende Konzept wird in der Folge erläutert. Das i -te Volumenelement eines diskretisierten Streuers wird durch eine EM-Welle E_i^{inc} beleuchtet. Aus den Objekteigenschaften des i -ten Volumenelementes, die durch den Polarisierbarkeitstensor $\bar{\bar{\alpha}}_i$ ausgedrückt werden, resultiert eine Polarisierung des i -ten Volumenelementes, es wird zum Dipol. Der i -te Dipol mit Polarisierung \bar{p}_i wird aber auch durch die emittierten EM-Wellen aller anderen Dipole beleuchtet, was durch die Dyade $\bar{\bar{A}}(\bar{r}_i, \bar{r}_j)$ ausgedrückt wird.

$$\bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{inc}} = \bar{p}_i + \bar{\bar{\alpha}}_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \bar{\bar{A}}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \cdot \bar{p}_j \quad (2.27)$$

Diese Gleichung kann in die Standardform gebracht werden:

$$\bar{\bar{Z}}\bar{x} = \bar{b} \quad (2.28)$$

mit N diskreten Dipolen folgt daraus:

$$\bar{\bar{Z}} = \begin{bmatrix} \bar{I} & \cdots \bar{\alpha}_1 \bar{A}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\alpha}_N \bar{A}_{N1} \cdots & \bar{I} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\bar{x} = \left[\bar{p}_1^T \cdots \bar{p}_N^T \right]^T \quad (2.30)$$

$$\bar{b} = \left[(\bar{\alpha}_1 \bar{E}_1^{\text{inc}})^T \cdots (\bar{\alpha}_N \bar{E}_N^{\text{inc}})^T \right]^T \quad (2.31)$$

wobei $\bar{\bar{Z}}$ die Impedanzmatrix bezeichnet und \bar{x} für den unbekannten Spaltenvektor der Polarisationen steht und \bar{b} die rechte Seite der Gleichung bezeichnet. Die Impedanzmatrix hat die Dimension $3N \times 3N$, die Vektoren haben die Dimensionen $3N$. Die Gleichung kann durch numerische Verfahren gelöst werden. Als Standardverfahren eignet sich die *conjugate gradient method*, es gibt aber auch andere, vergleichbare Lösungsalgorithmen. In der Literatur wird mehrheitlich die Methode der konjugierten Gradienten, genauer der *bi-conjugate-gradient-stabilized (BiCGSTAB)*-Algorithmus [van derVorst 92], favorisiert. In dem im Rahmen dieser Arbeit implementierten Streumodells werden aber auch direkte Lösungsverfahren (z.B. Methoden des Softwarepaketes LAPACK [Anderson 99]) erfolgreich eingesetzt.

Nach der Lösung der Gleichung ist das gestreute Feld in die Richtung \bar{k}_s gegeben durch die kohärente Summe der einzelnen Felder der N Dipole:

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} k^2 (\bar{I} - \bar{k}_s \bar{k}_s) \sum_{i=1}^N \bar{p}_i \cdot e^{-i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_i} \quad (2.32)$$

Die einzelnen diskreten Dipole können prinzipiell unterschiedlich geformt sein, in der Literatur ist die Verwendung von kubischen [Draine 94], zylindrischen [Tsang 01] oder sphärische Dipole [Ding 03] bekannt. Für die Verwendung von architektonischen Baummodellen werden nur zylindrische Dipole in Betracht gezogen. Um die unterschiedliche Polarisierbarkeit des Holzes in

Wuchsrichtung und quer dazu zu berücksichtigen, wurden in Erweiterung der bestehenden Formulierung zwei relative elektrische Permittivitäten ϵ_{\parallel} und ϵ_{\perp} eingeführt. Die Polarisierbarkeit parallel zur Wuchsrichtung ist in der Regel höher, daher ist ϵ_{\parallel} grösser als ϵ_{\perp} . Die Wuchsrichtung wurde entlang der Zylinderachse angenommen. Diese unterschiedlichen elektrischen Permittivitäten wurden in den Polarisierbarkeitstensor $\bar{\alpha}_i$ in (2.27) übernommen, der die Polarisierbarkeit eines zylindrischen Dipols beschreibt.

Der Tensor $\bar{\alpha}_i$ für eine zylindrische Dipolzelle ist in [Tsang 01] detailliert hergeleitet und wird im ANHANG C.3 mit den Erweiterungen zur Berücksichtigung der Holzeigenschaften gezeigt. Um der Orientierung der zu simulierenden Zylinderelemente (Äste, Zweige etc.) Rechnung zu tragen, wird hier vorgeschlagen, den Polarisierbarkeitstensor $\bar{\alpha}_i$ mit Hilfe einer Rotationsmatrix M zu rotieren. Die Rotationsmatrix M kann aus den drei Euler- oder den Tait-Bryan-Matrizen abgeleitet werden. Da aus dem Datenformat des Baummodells die Tait-Bryan-Matrizen einfacher herzuleiten sind, wird in der vorliegenden Arbeit die letztere Version verwendet. Diese Rotation des Polarisierbarkeitstensors findet sich explizit nicht in der Literatur, ist jedoch eine logische Erweiterung für die Simulation komplexer Baummodelle:

$$\bar{\alpha} \rightarrow M \bar{\alpha} M^T \quad (2.33)$$

Für jeden individuellen Streuer im Simulationsszenario kann zu jeder Zeit das einfallende Feld vektoriell beschrieben werden. Dies erlaubt, mit Hilfe der DDA die Interaktionen zwischen den Einzelstreuern zu berücksichtigen und das rückgestreute Feld zu berechnen. Dazu muss aber die DDA-Formulierung an das frequenzmodulierte Signal angepasst werden, was im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

Anpassung an frequenzmodulierte *chirp*-Signale

Für die Simulation von *SAR*-Daten muss der Fall einer frequenzmodulierten einfallenden EM-Welle behandelt werden. Eine breit genutzte Möglichkeit ist es, die Frequenzmodulation in einzelne Schritte zu unterteilen, die mit konstanter Frequenz simuliert werden. In dieser Arbeit wird abweichend von diesem Ansatz die DDA an frequenzmodulierte Szenarien in der grundlegenden Formulierung so angepasst, dass auch kontinuierlich modulierte EM-Wellen zur Simulation verwendet werden können. Gegenüber dem Ansatz der Zerlegung in Einzelschritte bringt die Anpassung keine Vorteile bezüglich Rechenzeit, es sind in beiden Verfahren gleich viele Rechenschrit-

te notwendig. Die Anpassung ermöglicht aber eine realitätsnähere Simulation. Die Berechnung durch Schritte konstanter Frequenz erzeugt ein Szenario, das *in natura* nie eintritt. Einzelstreuer, die sich an abweichender *slant range*-Position befinden, haben im Verfahren mit konstanter Frequenz eine andere Phasenbeziehung als nach Berücksichtigung der Frequenzmodulation. Dieser Phasenunterschied ist durchaus relevant. Für ein P-Band-System mit einer Mittenfrequenz von 350 MHz und Bandbreite von 100 MHz beträgt nahe dieser Mittenfrequenz der Phasenunterschied zwischen frequenzmoduliertem Signal und Signal konstanter Frequenz in rund 15 m Entfernung eine halbe Wellenlänge. Das bedeutet, dass auch für kleine Abstände bereits relevante Phasenunterschiede auftreten können, die die Berechnung der Interaktionen beeinflussen. Im ANHANG C.4 wird die Problematik, die in der DDA durch frequenzmodulierte Signale auftritt, ausführlicher illustriert.

Um die Interaktion zwischen Dipolen realitätsnaher, d.h. unter Berücksichtigung der abweichenden Frequenz der interagierenden Signale zu erfassen, wird hier vorgeschlagen, das frequenzmodulierte Szenario auf ein nur <pseudo-konstantes> zurückzuführen. Die Anpassung wurde im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt und findet sich nach Wissen des Verfassers nicht in der Literatur. Es wird folgendes Konzept verfolgt:

- Die hier vorgestellte Anpassung für frequenzmodulierte Szenarien beruht auf der Annahme, dass das momentane Feld eines induzierten Dipols nur abhängig ist von der momentanen Frequenz. Die Rate der Frequenzänderung (*chirp rate*) hat also keinen Einfluss auf die momentane Polarisierung. Weiter wird davon ausgegangen, dass die momentane Polarisierung die Quelle einer EM-Welle ist, die sich mit der momentanen (instantanen) Frequenz in den Raum ausbreitet.
- Eine Empfangsposition an Position j wird durch das polarisierende Signal (entspricht dem direkten *chirp*-Signal) getroffen und gleichzeitig durch das um δt verzögerte Signal eines Dipols i . Im allgemeinen Fall stimmt die momentane Frequenz des direkten Signals und des verzögerten Signals von Dipol i nicht überein.
- Diese Situation wird gedanklich durch eine Situation ersetzt, in welcher Dipol j durch eine Welle konstanter Frequenz beleuchtet wird und zusätzlich ein Signal einer zweiten Quelle, des Dipols i , erhält, die ein Signal mit konstanter, aber abweichender Frequenz aussendet.
- In diesem Fall könnte die Interaktion durch die gemäss (C.36) - (C.39) angepasste Formulierung korrekt beschrieben werden.

- Die vorgeschlagene Korrektur basiert also auf der Idee, die momentane Polarisierung zum Zeitpunkt t des Dipols i durch eine zu ersetzen, die der Polarisierung entspräche, wenn der Dipol eine Polarisierung mit der konstanten Frequenz durchlaufen hätte, die er vor δt gehabt hätte.
- Dazu wird in einem ersten Schritt aus der Polarisierung des Dipols i zum Zeitpunkt t die Polarisierung zum Zeitpunkt $t - \delta t$ berechnet, indem die Frequenzmodulation in der Zeit zurückgerechnet wird.
- Die so gefundene Polarisierung wird mit der zum Zeitpunkt $t - \delta t$ korrekten momentanen Frequenz wiederum während δt propagiert.
- Nun beschreibt die Green-Funktion das zeitverzögerte Signal wieder korrekt, da von einer ‹pseudo-konstanten› Frequenz ausgegangen werden kann.

Die formale Herleitung dieser oben beschriebenen Korrektur lautet wie folgt:

$$\begin{aligned}
(\text{Signal}(t - \delta t)) \cdot (\text{Propagation während } \delta t \text{ mit inst. Freq.}) &= (\text{Signal}(t)) \cdot (\text{Korrektur}) \\
e^{-i(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t))(t - \delta_t)} \cdot e^{-i(\omega_{cm} + 2\alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t))\delta_t} &= e^{-i(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}}t)t} \cdot e^{-i\phi_{\text{corr}}} \\
(\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t))(t - \delta_t) + (\omega_{cm} + 2\alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t))\delta_t &= (\omega_{cm} + \alpha_{\text{chirp}}t)t + \phi_{\text{corr}} \\
\omega_{cm}t - \omega_{cm}\delta_t + \alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t)^2 + \omega_{cm}\delta_t + 2\alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t)\delta_t &= \omega_{cm}t + \alpha_{\text{chirp}}t^2 + \phi_{\text{corr}} \\
\alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t)^2 + 2\alpha_{\text{chirp}}(t - \delta_t)\delta_t - \alpha_{\text{chirp}}t^2 &= \phi_{\text{corr}} \\
\alpha_{\text{chirp}}t^2 - 2\alpha_{\text{chirp}}t\delta_t + \alpha_{\text{chirp}}\delta_t^2 + 2\alpha_{\text{chirp}}t\delta_t - 2\alpha_{\text{chirp}}\delta_t^2 - \alpha_{\text{chirp}}t^2 &= \phi_{\text{corr}} \\
-\alpha_{\text{chirp}}\delta_t^2 &= \phi_{\text{corr}} \tag{2.34}
\end{aligned}$$

Der resultierende Korrekturterm $e^{i\alpha_{\text{chirp}}\delta_t^2}$ zeigt seine Wirkung sowohl im *near field* als auch im *far field*, wie in ABB. 2.2 - ABB. 2.3 gezeigt wird. In ABB. 2.4 werden die durch die korrigierte und unkorrigierte Green-Funktion berechneten Signale mit einem Signal verglichen, das aus einzelnen Schritten konstanter Frequenz berechnet worden ist. Das Signal der korrigierten Green-Funktion und das Signal aus der Berechnung durch Frequenzschritte stimmen überein.

Neben der Phasenkorrektur der Green-Funktion wird ein zweiter Korrekturterm eingeführt, der die Frequenzabhängigkeit von Amplitude und Phase des Polarisationsensors korrigiert. Die gesamte vorgeschlagene Korrektur besteht demnach aus zwei Termen ϕ' und $\bar{\bar{\phi}}''$. Der Term ϕ'

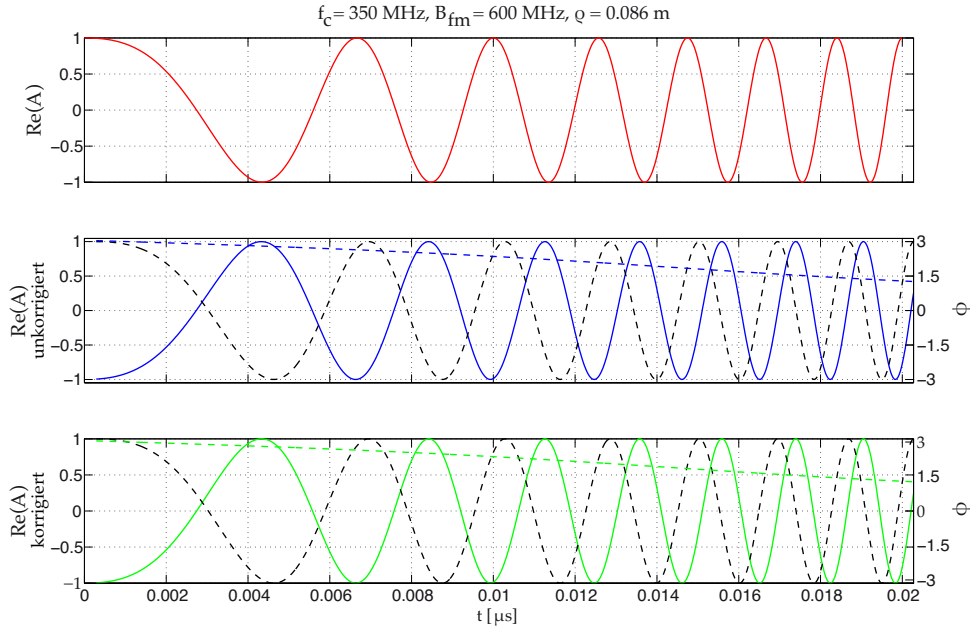


ABB. 2.2: Frequenzmoduliertes Signal eines Dipols im *near field*. Oben: rot: polarisierendes Signal, Mitte: Berechnung ohne Korrektur (blau), zeitlich verschobenes polarisierendes Signal (schwarz gestrichelt), Phase zwischen *near field*-Signal und polarisierendem Signal (blau gestrichelt), Unten: Berechnung mit Korrektur (grün), zeitlich verschobenes polarisierendes Signal (schwarz gestrichelt), Phase zwischen *near field*-Signal und polarisierendem Signal (grün gestrichelt).

korrigiert die Phase für frequenzmodulierte Signale, der Term $\bar{\bar{\phi}}''$ korrigiert hauptsächlich die Polarisations-Amplitude eines Einzelstreuers, die auf Grund von frequenzabhängiger Polarisierbarkeit in frequenzmodulierten Szenarien nicht konstant ist. Die beiden Terme werden wie folgt angewendet:

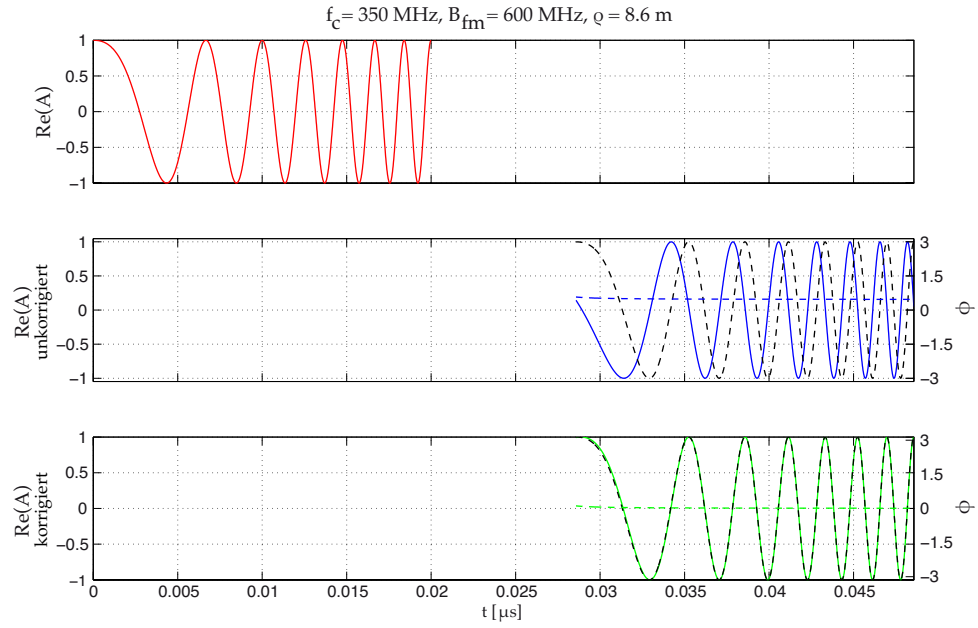


ABB. 2.3: Frequenzmoduliertes Signal eines Dipols im *far field*. Oben: rot: polarisierendes Signal, Mitte: Berechnung ohne Korrektur (blau), zeitlich verschobenes polarisierendes Signal (schwarz gestrichelt), Phase zwischen *far field*-Signal und polarisierendem Signal (blau gestrichelt), Unten: Berechnung mit Korrektur (grün), zeitlich verschobenes polarisierendes Signal (schwarz gestrichelt), Phase zwischen *far field*-Signal und polarisierendem Signal (grün gestrichelt). Nur die Berechnung mit Korrektur ist in Phase mit dem zeitlich verschobenen polarisierenden Signal.

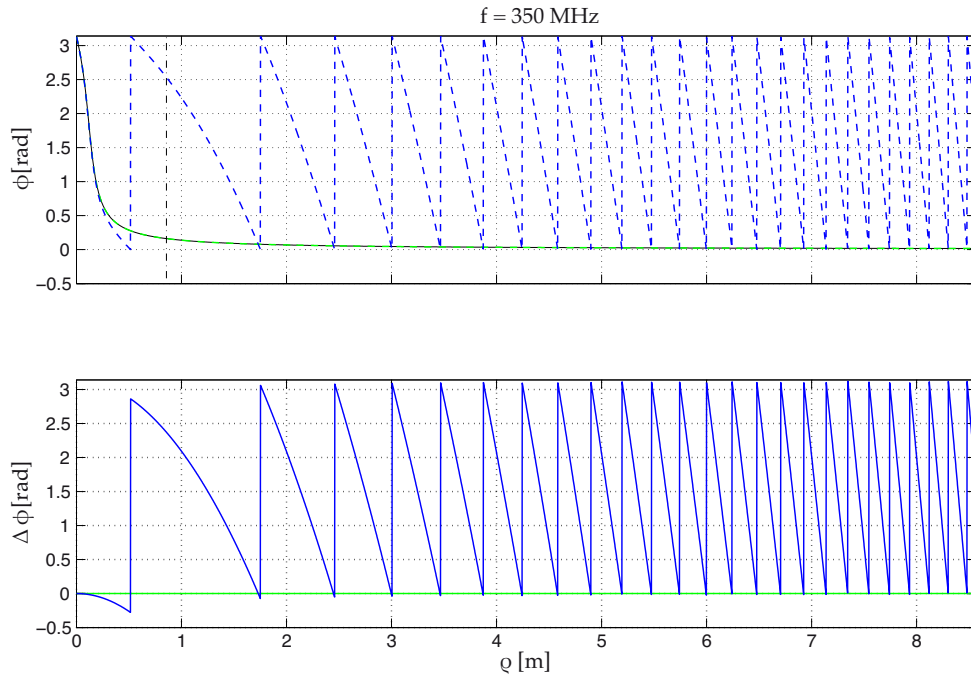


ABB. 2.4: Oben: Phase eines frequenzmodulierten Signals gegenüber dem polarisierenden Signal in Abhängigkeit von der Entfernung zur Quelle. Die Referenzfunktion (schwarz gestrichelt unter grün) wurde durch Einzelschritte konstanter Frequenz berechnet. Die Phase des ohne Korrektur berechneten Signals (blau) unterscheidet sich deutlich von der Referenz, während zwischen dem mit der vorgeschlagenen Korrektur berechneten Signal (grün) und der Referenz kein Unterschied festzustellen ist. Unten: Phasenverschiebung zwischen Referenzfunktion und unkorrigiertem Signal (blau) und korrigiertem Signal (grün).

$$\bar{\bar{A}}(i, j, k(t)) \rightarrow \bar{\bar{\phi}}_{\text{corr}}(i, j) * \bar{\bar{A}}(i, j, k(t)) \quad (2.35)$$

$$\bar{\bar{\phi}}_{\text{corr}}(i, j) = \phi' \cdot \bar{\bar{\phi}}''(i, j) \quad (2.36)$$

$$\phi' = e^{i \cdot (\alpha_{\text{chirp}} \delta_t^2)} \quad (2.37)$$

$$\bar{\bar{\phi}}'' = \bar{\bar{\alpha}}_j(k(\theta_j - \delta_t)) \cdot [\bar{\bar{\alpha}}_j(k(\theta))]^{-1} \quad (2.38)$$

Beide Korrekturterme sind nur wirksam, wenn $\alpha_{\text{chirp}} \neq 0$. Im Fall der konstanten Frequenz kollabiert die Korrektur zu $\bar{\bar{I}}$.

Die Anpassungen an die Frequenzmodulation zerstören die Block-Toeplitz-Struktur der Dyade $\bar{\bar{A}}$ (nach der Anpassung ist $\bar{\bar{A}}$ ein Tensor und keine Dyade mehr), so dass durch die Verwendung der *fast fourier transformation (fft)* oder verwandte Algorithmen beschleunigte Verfahren zur Berechnung des Matrix-Vektorproduktes, wie sie im BiCGSTAB-Algorithmus verwendet werden können [Goodman 91], [Barrowes 01], nicht mehr anwendbar sind.

2.1.4 Weg zum Sensor

Die Polarisationen $p_i(t)$ in der DDA werden für einen Zeitschritt t berechnet. Jede Polarisation $p_i(t)$ ist nun die Quelle einer EM-Welle, die den Empfänger bei $\bar{r}_{\text{receiver}}$ zur Zeit ϑ_i erreicht.

Das Verfahren zur Integration von Bodeninteraktionen ist analog zu den Berechnungen für die einfallende Welle. Ausgehend von einer monostatischen Konfiguration, sind das direkte Feld $\bar{s}_{r_0}^{\text{rec}}$ und das durch Bodeninteraktion betroffene Feld $\bar{s}_{r_{\text{refl}}}^{\text{rec}}$ gegeben durch:

$$\bar{s}_{r_0}^{\text{rec}}(\vartheta_i, u) = \Gamma_i^{\text{receive}}(\bar{r}_i, u) \cdot \frac{k(t)^2}{4\pi \varrho_i} \cdot (\bar{\bar{I}} - \bar{k}_s \bar{k}_s) \cdot \bar{p}_i(t) \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_{r_{\text{refl}}}^{\text{rec}}(\vartheta'_i, u) &= \bar{r}(\Omega_i) \cdot \Gamma_r(\bar{r}'_i, u) \cdot \frac{k(t)^2}{4\pi \varrho'_i} \cdot \\ &(\bar{\bar{I}} - \bar{k}'_s \bar{k}'_s) \cdot \bar{p}_i(t) \end{aligned} \quad (2.40)$$

mit:

$$\vartheta_i = t + \varrho_i/c \quad (2.41)$$

$$\vartheta'_i = t + \varrho'_i/c \quad (2.42)$$

$$\Gamma_i^{receive}(\bar{r}_i, u) : \text{Antennendiagramm des Empfängers} \quad (2.43)$$

$$\bar{k}_s = \bar{r}_{\text{receiver}} - \bar{r}_i \quad (2.44)$$

$$\bar{k}'_s = \bar{r}_{\text{receiver}} - \bar{r}'_i \quad (2.45)$$

Das Antennendiagramm wird für den monostatischen Fall mit dem Antennendiagramm der Sendeanenne (2.13) gleichgesetzt:

$$\Gamma_i^{receive}(\bar{r}_i, u) = \Gamma_i^{transmit}(\bar{r}_i, u) \quad (2.46)$$

2.1.5 Empfänger

In diesem Modul wird die Trägerfrequenz des berechneten einfallenden Feldes an der Empfängerposition demoduliert und anschliessend in eine horizontale und vertikale Komponente zerlegt. Für die Demodulation wird die Referenzfunktion (Trägerfrequenz) mit negativem Argument mit dem Signal multipliziert:

$$\bar{s}_i^{\text{rec,demod}}(\vartheta_i, u) = \bar{s}_i^{\text{rec}}(\vartheta_i, u) \cdot e^{\omega_c \vartheta_i} \quad (2.47)$$

Resultat dieses letzten Schrittes ist das demodulierte *chirp*-Signal in den zwei polarimetrischen Empfangskanälen.

Die Daten können in diesem letzten Schritt mit polarimetrischem Rauschen (*polarimetric noise*) versehen werden [vanZyl 90]. Dieser Schritt ist für die Simulation nicht zwingend notwendig, erhöht aber die Vergleichbarkeit simulierter und realer *SAR*-Daten.

$$\begin{bmatrix} S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$\begin{bmatrix} N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h^{\text{noise}} \cdot e^{j\phi_h^{\text{noise}}} & \sigma_x^{\text{noise}} \cdot e^{j\phi_x^{\text{noise}}} \\ \sigma_x^{\text{noise}} \cdot e^{j\phi_x^{\text{noise}}} & \sigma_v^{\text{noise}} \cdot e^{j\phi_v^{\text{noise}}} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

mit σ_i^{noise} , ein Gauss-verteilter Parameter mit Mittelwert 0, ϕ_i^{noise} eine uniform verteilte Phase mit $\phi_i^{\text{noise}} \in [0, \pi)$.

Bis hierhin wurde gezeigt, wie ein Algorithmus für die Lösung des auf Maxwell-Gleichungen basierten Streuproblems in ein Verfahren eingebettet werden kann, das die Simulation des *SAR*-Abbildungsprozesses erlaubt. In der Folge wird die eigentliche *SAR*-Datensimulation gezeigt und verschiedene Vereinfachungen, die die Rechenzeit für den Simulationsprozess reduzieren.

2.1.6 Datensimulation

Um die Simulation von grossen Objekten zu beschleunigen, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit implementiert, neben Rohdaten auch teilweise fokussierte Daten zu simulieren. Unter teilweise fokussiert wird verstanden, dass die simulierten Daten Rohdaten entsprechen, die in der Azimut- oder *range*-Dimension fokussiert worden sind.

Rohdaten (*raw data*)

An ausgewählten Azimutpositionen werden die Simulationsschritte für einzelne Zeitschritte durchlaufen. Die berechneten demodulierten Signale der N Dipole werden in die Rohdatenmatrix der einzelnen Kanäle geschrieben. Um alle vier polarimetrischen Kanäle zu erhalten, wird für jeden Zeitschritt die Berechnung der Objektinteraktion für eine horizontal polarisierte einfallende Welle berechnet und einmal für eine vertikal polarisierte. Die Azimutpositionen und Zeitschritte müssen für eine anschliessende optimale Fokussierung wie folgt gewählt werden:

$$t \in [0.5 \cdot T_{\text{near range}}, 0.5 \cdot T_{\text{near range}} + T_p] \quad (2.50)$$

$$\Delta t = f_s^{-1} \quad (2.51)$$

$$u \in [-|r_i| \tan(\delta_a), |r_i| \tan(\delta_a)] \quad (2.52)$$

$$\Delta u = |\bar{v}_{\text{sensor}}| \cdot \text{PRF}^{-1} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned}
T_p &: \text{Pulslänge [s]} \\
t &: \text{Zeit in [s]} \\
\Delta t &: \text{Zeitschritt [s]} \\
f_s &: \text{sampling-Frequenz [Hz]} \\
\delta_a &: \text{Öffnungswinkel der Antenne} \\
u &: \text{Azimutposition [m]} \\
\bar{v}_{\text{sensor}} &: \text{Sensorgeschwindigkeit [m s}^{-1}\text{]} \\
\Delta u &: \text{Azimutpositionen [m]} \\
PRF &: \text{Pulsrepetitions-Frequenz [Hz]}
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Azimut-fokussierte Daten

Diese Art von Daten tritt bei der konventionellen SAR-Datenprozessierung nicht auf. Für die Simulation bedeutet diese Vereinfachung, dass für ein Objekt nicht die gesamte synthetische Apertur simuliert wird, sondern nur ein oder wenige Echos an den Positionen u , für welche das Objekt nahe der aktuellen 0 Hz-Dopplerkoordinate liegt. Die Objektkoordinate y_i liegt dabei im Intervall Δu , das durch die PRF definiert wird:

$$y_i \in [u - 0.5\Delta u, u + 0.5\Delta u[\tag{2.55}$$

Um die Azimutfokussierung zu simulieren, wird das Signal jedes Dipols mit der *azimuth point spread function (PSF)* $\text{psf}_{\text{azimuth}}(y', y_i)$ multipliziert, wobei y' eine beliebige Azimutkoordinate in der Rohdatenmatrix (Spalte in der Datenmatrix) bezeichnet. Die PSF ist eine Funktion der Azimutauflösung D_u und im einfachsten theoretischen Fall nach [Soumekh 99] gegeben durch:

$$\bar{s}_i^{\text{rec, demod}}(\vartheta_i, y') = \bar{s}_i^{\text{rec}}(\vartheta_i, u) \cdot e^{-\omega_c \vartheta_i} \cdot \text{psf}_{\text{azimuth}}(y', y_i) \tag{2.56}$$

mit:

$$\text{psf}_{\text{azimuth}}(y', y_i) = \text{sinc}\left(\frac{B_u \cdot (y' - y_i)}{2\pi}\right) \quad (2.57)$$

$$B_u = \frac{8\pi}{D_u} \quad (2.58)$$

$$(2.59)$$

Das berechnete Signal $\bar{s}_i^{\text{rec, demod}}(\vartheta_i, y')$ an der Sensorposition wird nur dann registriert, wenn:

$$(y' - y_i) \in \left[-\frac{2\pi}{B_u}, \frac{2\pi}{B_u}\right] \quad (2.60)$$

In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren für die Simulation der Datenprodukte verwendet. Die Rohdatensimulation komplexer Szenen benötigt eine unrealistische Rechenzeit, daher ist eine Vereinfachung zwingend. Die Wahl fiel auf die azimuthfokussierte Näherung, da dieser Ansatz das Maximum der Frequenzabhängigkeit der Streumechanismen beibehält.

Range fokussierte Daten

Ein Datenprodukt, das bereits *range*-fokussierten Rohdaten entspricht, kann erzeugt werden, indem die Frequenzabhängigkeit der Streumechanismen aufgegeben wird. Unter Annahme einer konstanten Antwort eines Dipols werden die Simulationsschritte an jeder *echo*-Position für die Zeitschritte ϑ_i durchlaufen, deren momentan einfallende Frequenz der Trägerfrequenz (oder einer beliebig bestimmten Frequenz) entsprechen:

$$\vartheta_i = t - \frac{\rho_i}{c} = \frac{T_p}{2} \quad (2.61)$$

Nachdem die Polarisationen p_i für einen Zeitschritt berechnet worden sind, wird nur der Dipol berücksichtigt für den $\vartheta_i = T_p/2$ gilt. Die Simulationsschritte werden so lange wiederholt, bis alle Dipole erfasst sind. Um die eigentliche *range*-Fokussierung zu simulieren wird das Signal jedes Dipols p_i mit der *range point spread function* $\text{psf}_{\text{range}}(\vartheta', x_i)$ multipliziert. Der Parameter ϑ' ist eine beliebige *range*-Koordinate in der Rohdatenmatrix. Die *range point spread function* ist eine Funktion der *chirp*-Bandbreite B_t [Soumekh 99]:

$$\begin{aligned} \bar{s}_i^{\text{rec,demod}}(\vartheta', u) &= \bar{s}_i^{\text{rec}}(\vartheta_i, u) \cdot e^{-\omega_c \vartheta_i} \\ &\quad \cdot \text{psf}_{\text{range}}(\vartheta', \vartheta_i) \end{aligned} \quad (2.62)$$

mit

$$\text{psf}_{\text{range}}(\vartheta', \vartheta_i) = \text{sinc}\left(\frac{B_t \cdot c(\vartheta' - \vartheta_i)}{2\pi}\right) \quad (2.63)$$

$$B_t = 2(k_{\text{max}} - k_{\text{min}}) \quad (2.64)$$

Das Signal wird registriert, falls:

$$c(\vartheta' - \vartheta_i) \in \left[-\frac{2\pi}{B_t}, \frac{2\pi}{B_t}\right] \quad (2.65)$$

Fokussierte Daten (single look complex)

Wenn die Vorgehensweise zur Simulation von Azimut-fokussierten und *range*-fokussierten Daten kombiniert wird, ist es möglich das Äquivalent von fokussierten Daten *single look complex (SLC)* direkt zu simulieren.

2.1.7 Implementierung der Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Simulationssoftware von Grund auf neu implementiert. Für die DDA existiert zwar ein frei erhältlicher Fortran-*code* DDSCAT [Draine 12], nach eingehender Prüfung hat sich aber gezeigt, dass der DDSCAT-*code* nur mit sehr grossem Aufwand oder nur unzureichend an die Simulation von SAR-Daten angepasst werden kann. Daher wurde die Simulationssoftware ausgehend von einem objektorientierten Ansatz in C++ implementiert.

Folgende Punkte zeigen die grundsätzlichen Überlegungen zur Implementierung:

- Die *software* ist modular aufgebaut. Das bedeutet, dass einzelne Funktionsschritte als Klassen realisiert sind. Die Klassen haben nur auf die jeweils für den weiteren Simulationsschritt relevanten Daten anderer Klassen Zugriff.
- Die Modularität ermöglicht eine Erweiterung der Simulation um weitere Parameter mit geringem Aufwand.

- Um die Vorteile moderner *Multi-Prozessor* Systemen auszunutzen, ist die Implementierung von Anfang an auf ein *multi threading* ausgelegt.

In Abweichung zu der in der Literatur vorgeschlagenen Verwendung der stabilisierten *bi-conjugate gradient method* (BiCGSTAB) [van derVorst 92] zur Lösung der grundlegenden Matrix-Gleichung der DDA wurde zusätzlich die Verwendung von direkten Lösungsverfahren der linearen Algebra Bibliothek LAPACK [Anderson 99] implementiert. Die Evaluation hat gezeigt, dass die verschiedenen Methoden bezüglich numerischer Genauigkeit gleichwertig, die LAPACK-Methoden jedoch etwas weniger zeitintensiv sind.

2.1.8 Interaktionen in der *discrete dipole approximation* (DDA)

Vegetationssimulationen werden auch mit einfacheren Simulationsansätzen durchgeführt, die wesentlich kürzere Rechenzeit benötigen, z.B. die Annahme, dass einzelne kohärente Streuer zum Gesamtsignal addiert werden, worauf z. B. der *SAR*-Simulator des Softwarepaketes PolSAR Pro [Pottier 11] beruht. Gegen diese Methode spricht, dass sie nicht in der Lage ist, Interaktionen zwischen Einzelstreuern zu modellieren. Ein einfaches numerisches Beispiel soll dieses Problem verdeutlichen. Dafür werden zwei kubische Dipole betrachtet, die voneinander einen horizontalen und vertikalen Abstand haben. Diese werden von einer horizontal polarisierten EM-Welle, die von der Sensorposition ausgeht, beleuchtet. Die Erwartung ist, dass die kohärente Addition der Rückstreuung der beiden Dipole auch nur in der horizontalen Polarisation auftritt, da die kubischen Dipole keine Polarisationsdrehung verursachen können.

$$\begin{array}{ll}
 \text{1. Dipol: } \{0, 0, 0\}^T & \text{2. Dipol: } \{0.1, 0.1, 0.1\}^T \\
 \text{Sensor: } \{-10, 0, 0\}^T & \text{Polarisation: horizontal, } \{0, 1, 0\}^T \\
 \epsilon_r = 2 & d = 0.2 \rightarrow \Delta V = 0.008 \\
 k = 0.2 \cdot \pi & t = 0
 \end{array}$$

Der Feldvektor für das einfallende Feld an den Positionen der beiden Dipole hat nur Beiträge in horizontaler Richtung, was der y-Koordinate entspricht:

$$\begin{aligned}
\text{1. Dipol: } \quad & \text{x: } 0 \\
& \text{y: } 7.958 \cdot 10^{-3} \\
& \text{z: } 0 \\
\text{2. Dipol: } \quad & \text{x: } 0 \\
& \text{y: } (7.862 + 0.499i) \cdot 10^{-3} \\
& \text{z: } 0
\end{aligned}$$

Nach Lösung der DDA-Gleichung resultiert ein zurückgestreutes Feld \bar{E}_s an den Positionen der beiden Dipole:

$$\begin{aligned}
\text{1. Dipol: } \quad & \text{x: } (0.489 + 0.028i) \cdot 10^{-5} \\
& \text{y: } (4.869 + 0i) \cdot 10^{-5} \\
& \text{z: } (0.489 + 0.028i) \cdot 10^{-5} \\
\text{2. Dipol: } \quad & \text{x: } (0.493 + 0.027i) \cdot 10^{-5} \\
& \text{y: } (4.811 + 0.305i) \cdot 10^{-5} \\
& \text{z: } (0.493 + 0.027i) \cdot 10^{-5}
\end{aligned}$$

Doch dies entspricht einem empfangenen Feld an der Position des Sensors, das in allen drei Raumrichtungen Feldstärken > 0 aufweist:

$$\begin{aligned}
\bar{E}_s(\bar{r} = \text{Sender}): \quad & \text{x: } (0.777 + 0.049i) \cdot 10^{-7} \\
& \text{y: } (7.642 + 0.481i) \cdot 10^{-7} \\
& \text{z: } (0.777 + 0.049i) \cdot 10^{-7}
\end{aligned}$$

Wie deutlich wird, generiert die Konfiguration dieses einfachen Beispiels nicht nur horizontal polarisierte Rückstreuung, sondern auch eine (deutlich schwächere) kreuzpolare. Dies ist nur durch die Interaktion der beiden Dipole miteinander zu erklären und unterscheidet die DDA von andern Methoden der Rohdatensimulation, bei denen die Signale einzelner *targets* lediglich kohärent und ohne Berücksichtigung der Interaktion addiert werden. Interaktionen führen also zu kreuzpolarer Rückstreuung, die auf Grund der Geometrie der einzelnen Streuer nicht zu erwarten ist. Da Methoden zur Biomasseschätzung auch im P-Band auf gerade dieser kreuzpolaren Rückstreuung beruhen, was in dieser Arbeit noch gezeigt werden wird, wird die Berücksichtigung

von Streuerinteraktionen als zwingend erachtet für die naturnahe Simulation von *SAR*-Daten. Die Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Streuern in der DDA ist vollständig, da die Methode auf der direkten Lösung der Maxwell-Gleichungen beruht. Es müssen daher keine einschränkenden Annahmen getroffen werden, die die Interaktionen beschränken.

2.2 Baummodell und Modellierung eines Waldstandortes

2.2.1 Baummodell

Grundlage für die Simulation eines Waldstandortes ist ein Baummodell. Dieses sollte die Geometrie so realitätsnah wie möglich wiedergeben. Im Idealfall wird die Strukturänderung, die im Lebenslauf eines Baumes auftritt, durch das Modell nachgebildet. Ein solches ökologisch kalibriertes Baummodell wird in dieser Arbeit verwendet. Das Baummodell wurde von R. P. Leersnijder an der Universität von Wageningen (Niederlande) entwickelt [Leersnijder 92] und ist in Form eines Softwarepaketes «Tree Growth» verfügbar. In ABB. 2.5 ist eine grafische Repräsentation des Objektmodelles gezeigt.

Das Baummodell wird aus vorgegebenen Wachstumsregeln rekursiv erzeugt. Die elementaren Baueinheiten des Modells können Zylinder sein, es sind aber prinzipiell auch weitere geometrische Objekte möglich. Methodisch gesehen entspricht diese Art der Objektgenerierung einem Lindenmayer-System (L-System) [Prusinkiewicz 90]. L-Systeme sind weit verbreitet für die Erzeugung von realitätsnahen Vegetationsmodellen in der Computergrafik und wurden auch im Zusammenhang mit *SAR*-Fernerkundung zur Modellierung von Vegetation angewandt. In der folgenden Auswahl von Publikationen werden auf L-Systemen basierende Vegetationsmodelle zur Simulation von *SAR*-Daten vorgeschlagen: [Perttunen 98] [Lin 99] [Castel 01a] [Ding 03].

2.2.2 Vereinfachung und Anpassung des Baummodells zur Verwendung mit der DDA

Das in dieser Arbeit verwendete Baummodell basiert auf einzelnen Zylindern. Die Zahl der Einzelobjekte ist sehr gross ($\sim 10'000$ Einzelzylinder) und ist auf Grund von Rechenzeit und Speicherbedarf für eine Simulation mittels DDA direkt nicht verwendbar.

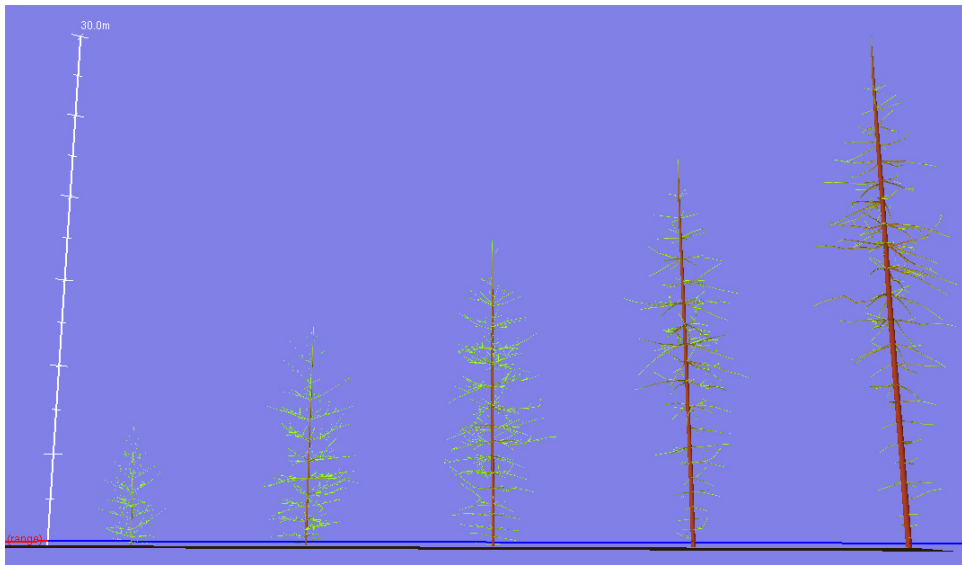


ABB. 2.5: Baummodell nach Leersnijder. Spezies: Föhre. Links: 10jähriger Baum, Rechts: 30-jähriger Baum, Zuwachs von links nach rechts jeweils 5 Jahre. Zur Darstellung wurden bis zu 25% der kleinsten Zylinder vernachlässigt.

Daher wird eine Vereinfachung des Modells vorgeschlagen, welche die für die Rückstreuung relevante Geometrie weitgehend konserviert, aber dennoch die Rechenzeit auf ein realistisches Mass reduziert.

Eine weit verbreitete Reduzierung der Komplexität von Objektmodellen für die Simulation von SAR-Daten ist die Vernachlässigung von gegenüber der verwendeten Wellenlänge sehr kleinen Elementen. Im Fall von Bäumen bedeutet dies, dass Blätter und feine Aststrukturen im P-Band als nicht relevant für die gesamte Rückstreuung angesehen werden. Für die in dieser Arbeit gezeigten Simulationsergebnisse wurde ein empirisch festgelegter Prozentsatz der am wenigsten voluminösen Einzel-Zylindern von der Simulation ausgeschlossen. In ABB. 2.6 wird deutlich, dass dieses Vorgehen bei einer geringen Reduktion der totalen Biomasse eine exponentielle Reduktion der Zahl der Einzelobjekte ermöglicht.

Die zulässige Reduktion wurde empirisch festgelegt, indem die Rückstreuung eines Einzelbaumes mit zunehmender Komplexität simuliert wurde. Um direktionale Effekte auszuschließen, wurde das Objektmodell in Schritten von 5° rotiert. In ABB. 2.7 wird dieses Vorgehen illustriert. Wie deutlich zu sehen ist, erreicht die Rückstreuung ab einem bestimmten Vereinfachungswert eine akzeptable, wenn auch nicht vollständige Stabilität. Die maximale zulässige Reduktion der Zylinderzahl wird mit dem Erreichen einer absehbaren Stabilität des Signals (erwartete Signalän-

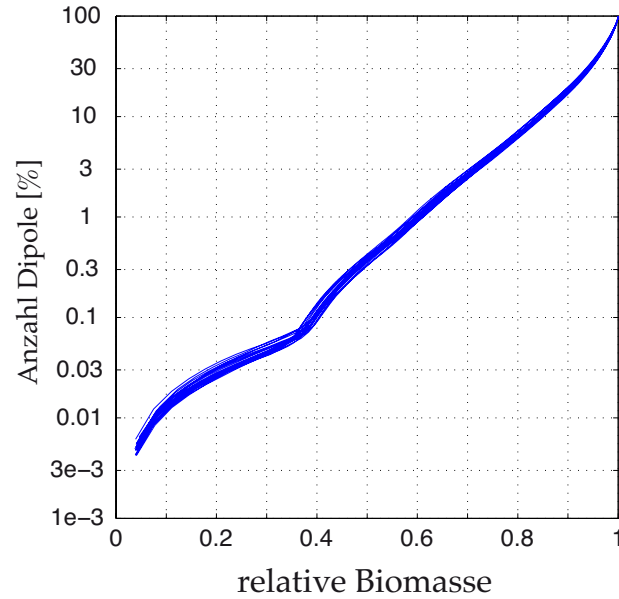


ABB. 2.6: Anzahl der Einzelzylinder in Beziehung zur berücksichtigten Biomasse. Das virtuelle Baumalter beträgt 20 Jahre, es wurden 20 individuelle Repräsentationen des Modells berücksichtigt.

derung bei zunehmender Komplexität < 2 dB) gleichgesetzt. In ABB. 2.8 sind die verschiedenen Vereinfachungsstufen des Baummodells gezeigt. In ABB. 2.9 und ABB. 2.10 sind zum Vergleich zwei Baumabstraktionen gezeigt, die in bestehenden Arbeiten für *full wave*-Simulation verwendet wurden. Deutlich wird, dass das in dieser Arbeit verwendete Baummodell trotz Vereinfachung eine naturnähere Repräsentation der Baumgeometrie ermöglicht. In dieser Arbeit wurden die Baummodelle wie in TAB. 2.2 gezeigt vereinfacht, was es ermöglicht, trotz hoher beibehaltener Biomasse nur $\sim 3\%$ der ursprünglich vorhandenen Dipole zu berücksichtigen

Die Modellkomplexität kann noch weiter reduziert werden, wenn aufeinanderfolgende Einzelzylinder, deren Radius und Richtung nur gering abweichen, durch einen einzigen Zylinder ersetzt werden, falls die resultierende Länge unterhalb der zulässigen Maximallänge liegt.

Alter des Baummodells	Berücksichtigte Biomasse
10y - 15y	75%
16y - 23y	72.5%
24y - 26y	70%
27y - 30y	67.5%

TAB. 2.2: Berücksichtigte Biomasse der Baummodelle. Das Baumalter bezieht sich auf Wachstumszyklen des simulierten Baumwachstums.

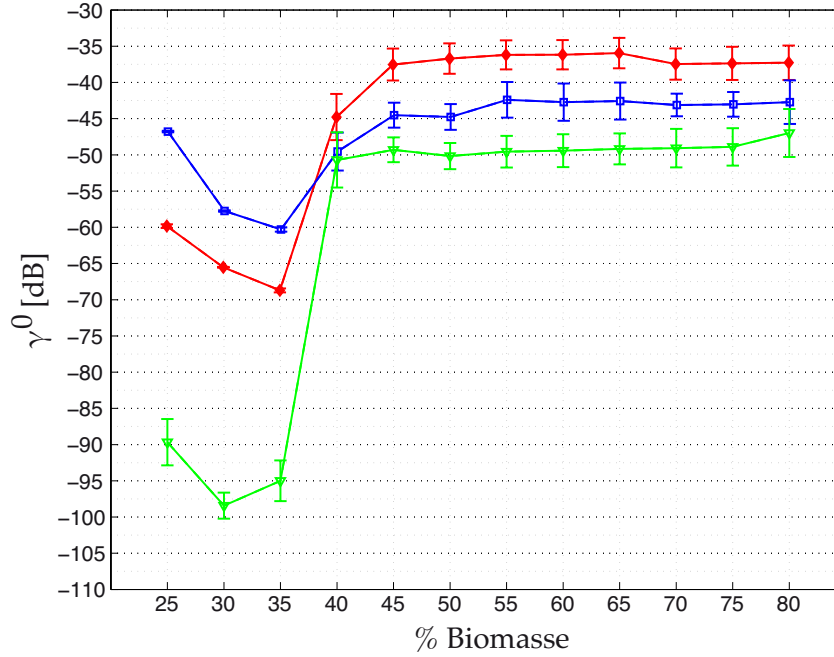


ABB. 2.7: Simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes (virtuelles Alter 20 Wachstumszyklen) mit unterschiedlicher Vereinfachung. Die x-Achse bezieht sich auf das berücksichtigte Biomassevolumen. Die gezeigten Mittelwerte und Streuungen beziehen sich auf den in 10°-Schritten rotierten Einzelbaum. Rot: HH, Blau: VV, Grün: HV.

Um die Einzelzylinder in der DDA als Dipolzellen zu verwenden, müssen weitere Anpassungen vorgenommen werden, da die Dimensionierung der Dipole in der DDA ein kritischer Parameter für die Genauigkeit des Simulationsergebnisses ist. Das Problem der Exaktheit wird durch Yurkin thematisiert. Die abschliessende Beurteilung der Genauigkeit der DDA steht noch aus, im schlimmsten Fall muss mit einem Fehler von einigen Prozenten gerechnet werden [Yurkin 07a].

Für die Verwendung kubischer Dipolzellen wurde durch Draine und Flatau die *rule of thumb* vorgeschlagen [Draine 94], 10 Dipole pro Wellenlänge im Medium $\lambda_m = \frac{\lambda_{\text{freespace}}}{\sqrt{|\epsilon_r|}}$ zu verwenden [Draine 94]. Für zylindrische Dipole wurde, so weit dem Verfasser bekannt ist, nichts vergleichbares publiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht, durch Vergleich der analytischen Lösung der Zylinderstreuung nach Tsang [Tsang 01] und verschiedener Parametrisierungen der DDA vergleichbare Aussagen zu machen.

In ABB. 2.11 und ABB. 2.12 werden die Berechnungen durch die DDA der analytischen Lösung gegenübergestellt. Die analytische Lösung ist anwendbar, so lange die Annahme gültig ist, dass das Streuverhalten des längenbeschränkten Zylinders mit Länge l und Radius a der eines gekürzten (*truncated*) unendlichen Zylinders entspricht [Stiles 96]:

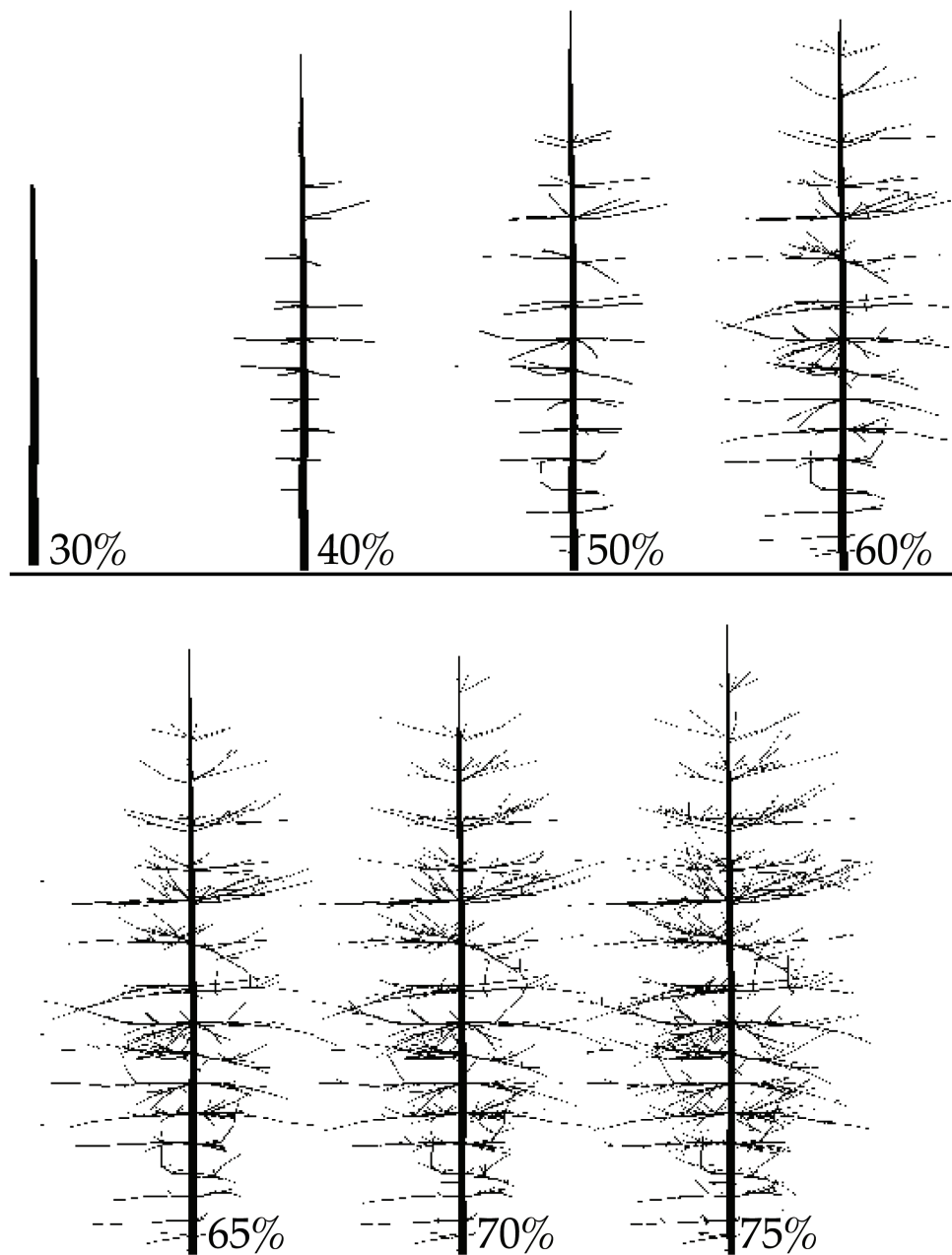


ABB. 2.8: Vereinfachung des Baummodells nach Leersnijder. Spezies: Föhre. Die Prozentangaben beziehen sich auf das berücksichtigte Biomassevolumen. Für Simulationen in dieser Arbeit werden Vereinfachungen mit mehr als 67% berücksichtigte Biomasse verwendet.

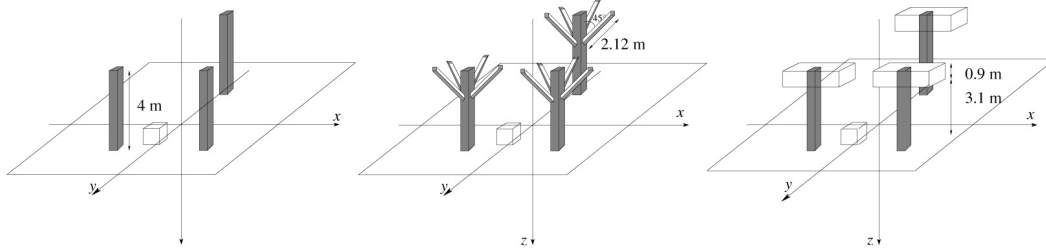


ABB. 2.9: Baummodell aus [Nguyen 06], verwendet in einer *full wave*-Simulation beruhend auf der *method of moments (MoM)*.

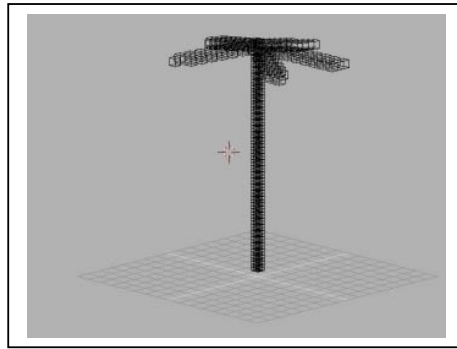


ABB. 2.10: Baummodell aus [deBadereau 03], verwendet in einer DDA-ähnlichen *full wave*-Simulation.

$$\frac{l}{a} > 20\sqrt{|\epsilon_r|} \quad (2.66)$$

Für dünne und lange Zylinder und für den Fall der senkrechten Beleuchtung ist die Übereinstimmung zwischen analytischer Lösung und DDA sehr gut. Für dickere Zylinder und für nicht-senkrechte Beleuchtung wird die Übereinstimmung für gewisse Frequenzen nicht zufriedenstellend wiedergegeben, dies besonders für die zur Zylinderachse parallele Polarisierung. Dabei ist aber zu bemerken, dass gerade für die dickeren Zylinder auch die analytische Lösung sich der oben erwähnten Limite annähert.

Basierend auf Empirie kann folgendes festgestellt werden:

- Die Lösung der DDA stimmt gut mit der analytischen Lösung überein, wenn die Längen der zylindrischen Dipolzellen die Wellenlänge im Medium nicht übersteigt.
- Die Simulation von grossen Radien stimmt, unabhängig von der verwendeten Zylinderlänge, weniger gut mit der analytischen Lösung überein

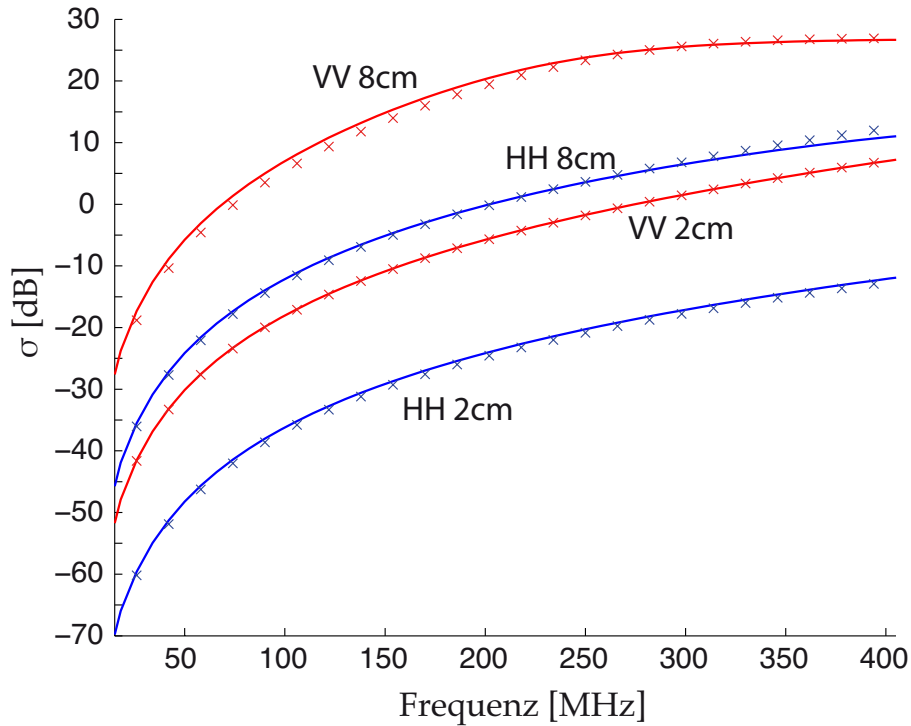


ABB. 2.11: Simulation zweier vertikaler Zylinder, $l = 6.4m$, $d = 2cm$ und $d = 8cm$, $\epsilon_r = 9.703 + 1.778i$. Einfallswinkel und Streuwinkel (*off-nadir angle*): 90° , d.h. senkrechte Beleuchtung. Die ausgezogene Linie entspricht der analytischen Lösung, Die Kreuze entsprechen der Lösung mittels DDA mit Länge der zylindrischen Dipole = 0.23 m. Rot: VV, blau: HH.

- Dipolzellen mit Zylinderlängen, die kleiner sind als der Radius des Zylinders, führen zu Resultaten, die von der analytischen Lösung abweichen.

Die Vereinfachung des Baummodells ermöglicht mit realistischem Rechenaufwand eine Simulation von Waldbeständen mit mehreren Einzelbäumen, deren Komplexität weitgehend erhalten werden kann. Dazu werden die Rückstreubeiträge der einzelnen Bäume kohärent addiert.

2.2.3 Simulation des Waldbestandes

Der eigentliche Waldbestand wird erzeugt, indem zufällig rotierte Repräsentationen des Baummodells auf ein reguläres Gitter gesetzt werden, wobei eine zufällige Abweichung um die Gitterpunkte toleriert wird. Diese Methode mag nicht ökologisch exakt sein, aber die Parametrisierung der Quasi-Zufälligkeit des Waldbestandes ist einfach verständlich und nachvollziehbar. Die selbe Methodik der Einzelbaumpositionierung findet sich in [Disney 06]. Komplexere Überlegungen zu geometrischen Eigenschaften von Waldbeständen finden sich in [Kasischke 94].

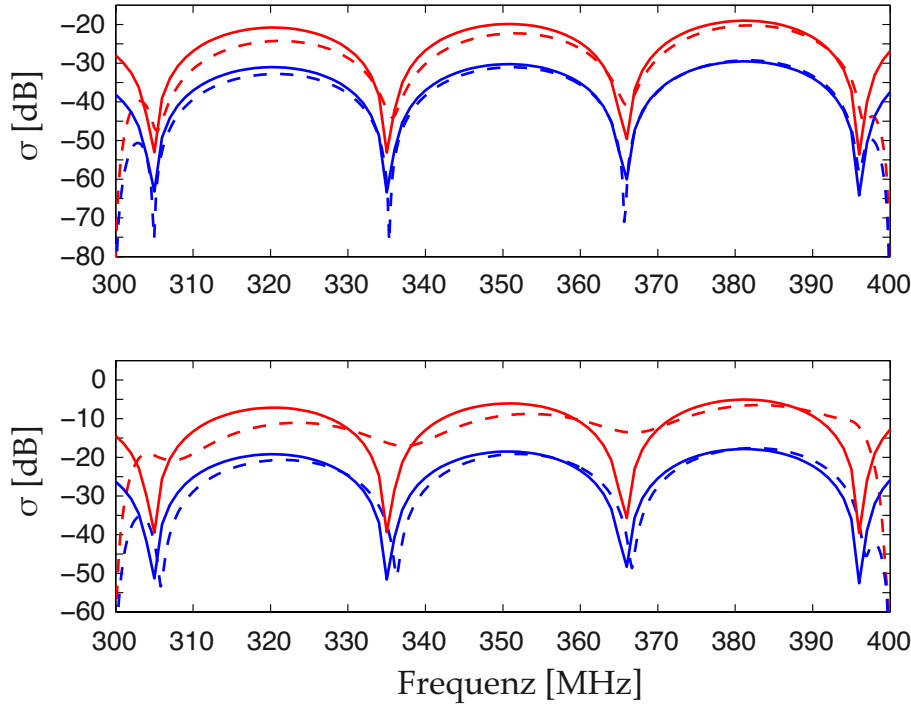


ABB. 2.12: Simulation zweier vertikaler Zylinder, $l = 6.4m$, $d = 4cm$ (oben) $d = 8cm$ (unten), $\epsilon_r = 9.703 + 1.778i$. Einfallswinkel und Streuwinkel (*off-nadir angle*): 35° . Die ausgezogene Linie entspricht der analytischen Lösung, die gestrichelten Linien entsprechen der Lösung mittels DDA mit Länge der zylindrischen Dipole = 0.23 m. Rot: VV, blau: HH.

Die Festlegung der Maschenweite des Gitters folgt der ökologischen Überlegung der Ausdünnung. Prinzipiell kann ein beabsichtigter Biomassewert pro Fläche auf verschiedene Arten erreicht werden. In [Woodhouse 06], [Brolly 10] und [Brolly 12a] wird das Wachstumsverhalten eines Waldbestandes mit den Parametern Anzahl Bäume pro Fläche N , Biomasse eines Einzelbaumes (z. B. geschätzt über den Stammradius) b und einem Ausdünnungskoeffizienten d wie folgt parametrisiert:

$$N \sim b^{-d} \quad (2.67)$$

Im Unterschied zu der in Woodhouse et al und Brolly et al. gezeigten Parametrisierung wird in dieser Arbeit direkt die Einzelbaumbiomasse als Basis verwendet, und nicht der Baumradius. Das hat zur Folge, dass die in dieser Arbeit verwendeten Parameterwerte für d im Vergleich zu den oben genannten Quellen halb so gross sind.

Ein Simulationsszenario wird erzeugt, indem eine anfängliche Stammanzahl und Biomasse festgelegt werden. Weitere Szenen werden aus dieser Grundannahme abgeleitet, indem ein Ausdünnungskoeffizient d gewählt wird und weitere Kombinationen aus Biomasse und Baumanzahl abgeleitet werden. So ist es möglich, nicht nur einen individuellen Waldbestand zu simulieren, sondern das natürliche Wachstumsverhalten nachzuempfinden.

Der Ausdünnungskoeffizient d beschreibt das Wachstumsverhalten eines Waldbestandes. Aus den möglichen Parameterwerten können drei abweichende Grundannahmen abgeleitet werden, die in ABB. 2.13 verdeutlicht sind:

1. $d < 0$: Die Biomasse pro Fläche wird erhöht, indem der Baumbestand (Anzahl Bäume N) bei nahezu konstantem Volumen der Einzelbäume erhöht wird. Dieses Szenario ist als Beschreibung des Wachstums unrealistisch, da anzunehmen ist, dass der Ressourcenbedarf mit ansteigender Einzelbaumbiomasse zunimmt und daher die Baumanzahl durch Konkurrenz reduziert wird.
2. $d = 0$: Eine Biomasseerhöhung wird erreicht, indem das Volumen der Einzelbäume erhöht wird, die Anzahl Bäume pro Fläche bleibt konstant. Dieses Wachstumsverhalten ist typisch für junge, wachsende Baumbestände, für die das Ressourcenangebot noch nicht limitiert ist und die noch nicht stark um die Ressourcen konkurrieren.
3. $0 < d < 1$ Die Erhöhung der Biomasse der Einzelbäume führt zu einer Ausdünnung durch Konkurrenz (*thinning*). Der Baumbestand pro Fläche nimmt bei steigender Biomasse der Einzelbäume ab. Höhere Gesamtbiomasse pro Fläche wird durch ältere Bäume mit grösserer Biomasse gebildet. Dieses Wachstumsverhalten ist typisch für Altbestände.
4. $d > 1$ Die Erhöhung der Biomasse der Einzelbäume führt zu einer starken Ausdünnung durch Konkurrenz (*thinning*). Der Baumbestand pro Fläche nimmt bei steigender Biomasse der Einzelbäume so stark ab, dass eine höhere Gesamtbiomasse pro Fläche durch Bestände mit jüngeren, weniger voluminösen Bäumen erreicht wird.

Im betrachteten tiefen Frequenzband (P-Band) sind auf Grund der hohen Penetrationsfähigkeit auch Bodeninteraktionen am rückgestreuten Signal beteiligt. Die Berücksichtigung der Bodeninteraktion wurde im Rahmen der Vorstellung der Methodik schon erläutert. Die Parametrisierung des Umfangs der Bodeninteraktion erfolgt durch den Fresnel-Reflexionskoeffizienten. Die einflussenden relativen Permittivitätswerte werden nach [Peplinski 95] geschätzt, weiter wird der Reflexionskoeffizient zur Simulation der Bodenrauigkeit gemäss [Disney 06] korrigiert.

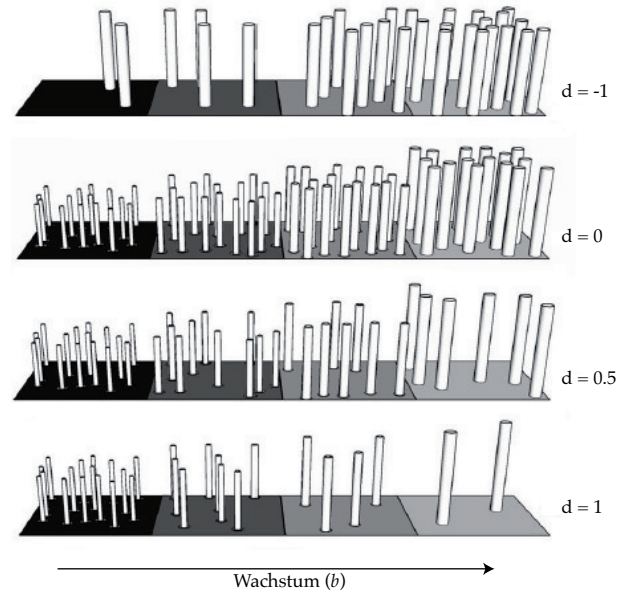


ABB. 2.13: Parametrisierung des Wachstumsverhaltens eines Waldbestandes. Die Anzahl Bäume pro Fläche N ist abhängig von der Biomasse der Einzelbäume b und einem Exponenten d . Von einer Wachstumsphase zur nächsten verdoppelt sich die Einzelbaumbiomasse b . Geringfügig modifiziert aus [Brolly 10].

In der DDA wird die Rückstreuung jedes Baumes individuell berechnet, Interaktionen aller Dipole eines Baumes werden berücksichtigt, Interaktionen zwischen Bäumen aber vernachlässigt. Die Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Dipolen eines Einzelbaumes beruht auf der Lösung der Maxwell-Gleichungen und ist somit nicht auf bestimmte Interaktionsordnungen beschränkt. Die Interaktionen sind stark abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des Holzes. In der Simulation wurde die Polarisierbarkeit des Holzes in Wachstumsrichtung (ϵ_{\parallel}) und quer dazu (ϵ_{\perp}) gesondert behandelt. Die Polarisierbarkeit in Wachstumsrichtung ist besser als senkrecht dazu, bei zunehmender Holzfeuchtigkeit nimmt der Unterschied sogar zu. Die Schätzung dieser dielektrischen Parameter basiert auf der Methodik und den Werten in [Torgovnikov 93] [Daian 05] [Daian 06]. In diesen Quellen finden sich feuchtigkeitsabhängige Parametrisierungen für die relative Permittivität bzw. Leitfähigkeit von verschiedenen Holzarten zwischen 915 MHz und 2375 MHz. Da in den Quellen eine explizite Behandlung der Wellenlänge des P-Bandes fehlt, wurden die benötigten Werte durch Extrapolation bestimmt. Die so gewonnenen Werte werden in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit in ABB. 2.14 gezeigt.

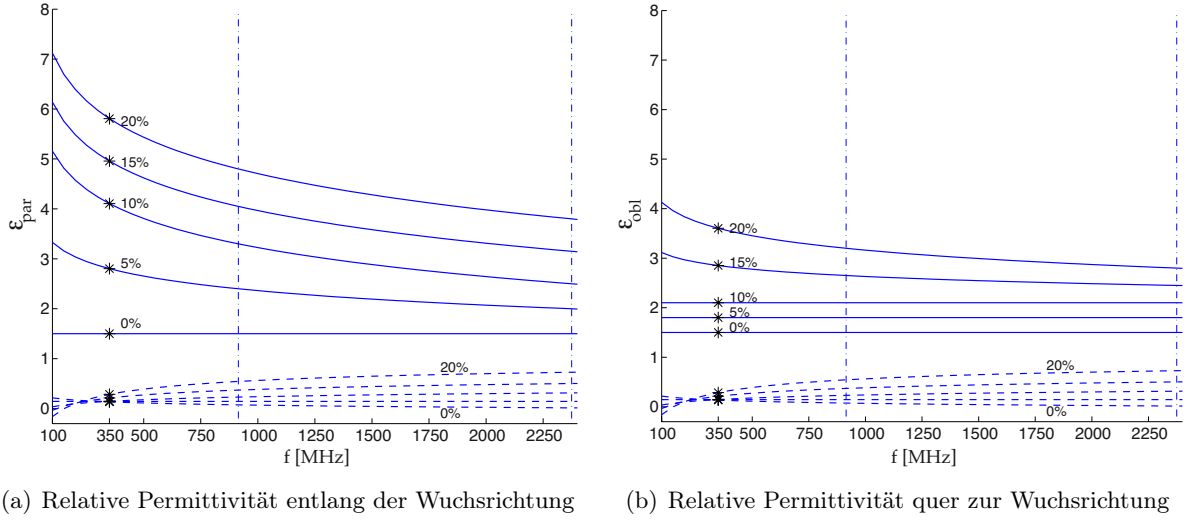


ABB. 2.14: Relative Permittivität von Nadelbaumholz entlang der Wuchsrichtung und quer zur Wuchsrichtung für Holzfeuchtigkeiten zwischen 0% und 20%. Ausgezogene Linie: Realteil, gestrichelt: Imaginärteil. Deutlich wird die zunehmende Frequenzabhängigkeit bei höherer Holzfeuchtigkeit. Die schwarzen Asterisken bezeichnen die Mittenfrequenz des betrachteten P-Bandes. Der aus der Literatur ([Torgovnikov 93] [Daian 05] [Daian 06]) gegebene Wertebereich bewegt sich zwischen 915 MHz und 2375 MHz.

2.3 Polarimetrische Datenverarbeitung

2.3.1 Polarisation

Wenn die Lage des elektrischen Feldstärke-Vektors einer EM-Welle für jeden Zeitpunkt und somit auch an jeder Ortskoordinate bekannt ist, ist die Welle vollständig polarisiert. In der Folge wird die Richtung des elektrischen Feldstärke-Vektors mit dem Polarisationsvektor gleichgesetzt. Es ist zweckmässig, die Lage des Polarisationsvektors \vec{E} in einem Vektorraum zu beschreiben, der durch die Ausbreitungsrichtung der EM-Welle \vec{e}_k und zwei weiteren dazu und zueinander orthogonalen Einheitsvektoren $\vec{e}_{p,q}$ zu beschreiben [Boerner 98]:

$$\vec{E} = \vec{e}_p E_p + \vec{e}_q E_q \quad (2.68)$$

Die beiden orthogonalen Einheitsvektoren beschreiben die Lagekomponenten des Polarisationsvektors und sind somit ihrerseits Polarisationszustände. Der durch die beiden Einheitsvektoren und dem Einheitsvektor der Ausbreitungsrichtung der EM-Welle aufgespannte Vektorraum $\{\vec{e}_p, \vec{e}_q, \vec{e}_k\}$ wird Polarisationsbasis genannt. Eine in der SAR-Fernerkundung weitverbreitete Po-

larisationsbasis ist die lineare Basis mit den beiden linearen Polarisationszuständen horizontal und vertikal als Einheitsvektoren. Diese Basis wird meist mit $\{h, v\}$ bezeichnet.

In einer Polarisationsbasis kann jeder allgemeine Polarisationszustand wie folgt beschrieben werden [Ulaby 90a]:

$$\bar{E}_{\{p,q\}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_p| e^{-i(\omega t + kz + \phi_p)} \\ |E_q| e^{-i(\omega t + kz + \phi_q)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_p| e^{-i\phi_p} \\ |E_q| e^{-i\phi_q} \end{bmatrix} e^{-i(\omega t + kz)} \quad (2.69)$$

Da der Polarisationszustand einer vollständig polarisierten und monochromatischen EM-Welle zeitlich und räumlich konstant ist, gilt:

$$\bar{E}_{\{p,q\}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_p| e^{-i\phi_p} \\ |E_q| e^{-i\phi_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_p| \\ |E_q| e^{-i\epsilon} \end{bmatrix} e^{-i\phi_p} \text{ mit } \epsilon = \phi_q - \phi_p \quad (2.70)$$

Die Lage des Polarisationsvektors kann in einer Polarisationsbasis alleine durch Linearkombination der zwei Polarisations-Einheitsvektoren skaliert mit den (reellen) Amplituden $|E_{p,q}|$ erhalten werden, wobei die beiden Basis-Polarisationen eine Phasenverschiebung ϵ aufweisen können. Geometrisch beschreibt eine Ellipse alle möglichen Aufenthaltsorte der Spitze des Polarisationsvektors. Geometrisch kann die Polarisationsellipse mit Hilfe der Parameter Orientierung Ψ und Elliptizität χ beschrieben werden, was in ABB. 2.15 verdeutlicht wird.

2.3.2 Kalibration

Die Messung eines *SAR*-Systems kann durch systematische Fehler beeinflusst werden. Da die interne Kalibration für aktuelle Systeme als dem Stand der Technik entsprechend angesehen wird, wird in der Folge das grundsätzliche Verfahren der externen Kalibration gezeigt. Die externe Kalibration kalibriert anhand von fokussierten polarimetrischen *SAR*-Daten (*SLC*) Messverzerrungen. Wird von Daten im Streumatrix-Format ausgegangen, ist die Messung möglicherweise durch zwei systemabhängige Parameter verfälscht:

1. Der Antennengewinn beim Senden und/oder Empfangen unterscheidet sich zwischen den polarimetrischen Sende- und Empfangsmoden (z.B. horizontale und vertikale Polarisation). Weiter kann die relative Phase zwischen den beiden Sende- oder Empfangsmoden verschoben sein. Diese Effekte werden zum komplexen Parameter *channel imbalance* zusammengefasst.

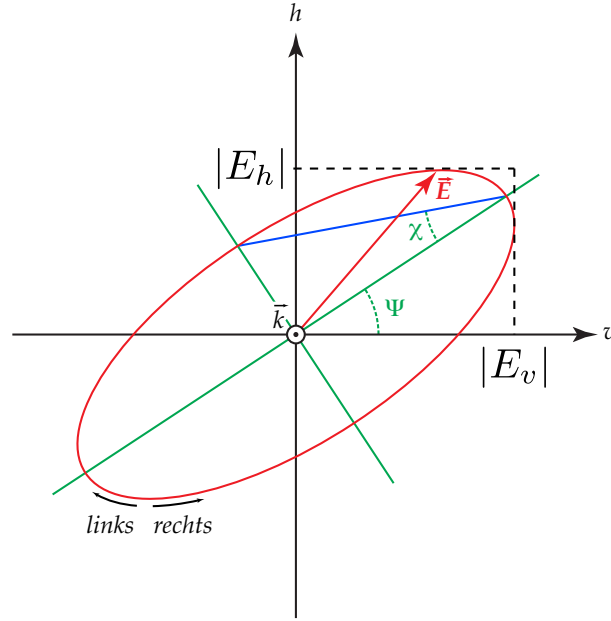


ABB. 2.15: Polarisationsellipse in der $\{h, v\}$ -Polarisationsbasis. Die Form und die Lage der Polarisationsellipse werden durch die (reellen) skalaren Amplituden $|E_{h,v}|$ und durch die Phasendifferenz ϵ bestimmt. Geometrisch kann die Polarisationsellipse mit Hilfe der Parameter Orientierung Ψ und Elliptizität χ beschrieben werden.

2. Konstruktionsbedingt kann eine Kopplung zwischen den verschiedenen Sende- und/oder Empfangskanälen auftreten. Dieser Effekt wird Kanalübersprechen (*cross talk*) genannt.

Die Parameter *cross talk* und *channel imbalance* führen dazu, dass die für ein natürliches stochastisches Volumen vorausgesetzte Symmetrie zwischen den kreuzpolaren Kanälen beeinträchtigt ist. In unkalibrierten Daten kann der HV-Kanal nicht mit dem VH-Kanal gleichgesetzt werden. Die kombinierten Effekte von *cross talk* und *channel imbalance* auf die Streumatrix können als Systemmodell in folgender Form dargestellt werden [vanZyl 90], [Freeman 91], [Klein 92], [Freeman 92b]:

$$[Z] = Ae^{i\phi} \cdot [R] \cdot [S] \cdot [T] + [N] \quad (2.71)$$

wobei $[Z]$ die gemessene (unkalibrierte) Streumatrix bezeichnet, A für einen allgemeinen Amplitudenfaktor steht und ϕ für die allgemeine Phase. Die Matrix $[R]$ ist die Verzerrungsmatrix für den Empfang¹, während $[T]$ die Verzerrungsmatrix für das Senden bezeichnet. Die Matrix $[S]$ ist die kalibrierte Streumatrix und $[N]$ die modellhafte Behandlung des additiven Rauschens. Es ist üblich, das Modell in folgender Form darzustellen [vanZyl 90]:

¹In einigen Quellen wird diese Matrix geschrieben als $[R]^T$.

$$\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = A e^{i\phi} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{hh} & \Sigma_{hv} \\ \Sigma_{vh} & \Sigma_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} + [N] \quad (2.72)$$

Die Verzerrungsmatrizen können durch verschiedene Algorithmen basierend auf den *SAR*-Daten alleine geschätzt werden, wenn verschiedene, im Allgemeinen wenig einschränkende Annahmen getroffen werden. Üblich ist z. B. die Annahme der Symmetrie für natürliche *targets*. Für die vorliegende Arbeit wurde das Verfahren nach Ainsworth verwendet [Ainsworth 06]. Eine detaillierte Übersicht über Kalibrationsverfahren allgemein gibt [Freeman 92a].

Die bildbasierten Verfahren (z. B. [Ainsworth 06]) sind nicht in der Lage, die Daten absolut zu kalibrieren, d.h. die gemessenen Intensitätswerte des rückgestreuten Signals mit einem Rückstreuquerschnitt in Beziehung zu setzen. Wenn die innere Kalibration erfolgreich durchgeführt worden ist, ist die radiometrische Kalibration im Allgemeinen schon erfolgt. Um die Kalibrationsgenauigkeit zu überprüfen, werden zusätzlich im Testgebiet Reflektoren mit bekanntem Rückstreuquerschnitt platziert, die die Überprüfung der radiometrischen Kalibration ermöglichen. Für die in dieser Arbeit verwendeten E-SAR-Daten wurde von der betreibenden Gesellschaft (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) eine absolute radiometrische Genauigkeit von ± 1 dB angegeben. Die Kalibration der verwendeten Daten wurde mit Hilfe der oben gezeigten Verfahren überprüft.

2.3.3 Streumatrix und Basistransformation

Die komplexen Elemente der Streumatrix $[S]$ beschreiben ein Objekt polarimetrisch und werden durch die vollpolarimetrische Messung geschätzt. Diese Messparameter werden wie folgt dargestellt (Indizes in Grossbuchstaben bezeichnen "Kanäle", z.B. PQ = P-polarisiert senden, Q-polarisiert empfangen; Indizes in Kleinbuchstaben bezeichnen Matrizenelemente):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{PP} & S_{QP} \\ S_{PQ} & S_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{pp} & S_{pq} \\ S_{qp} & S_{qq} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

mit p, q = zwei orthogonale Polarisationszustände (Basisvektoren einer Polarisationsbasis).

Eine Polarisationsbasis kann durch folgende Transformation in eine beliebige andere überführt werden:

$$\begin{bmatrix} S \end{bmatrix}_{\{m,n\}} = \begin{bmatrix} U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \end{bmatrix}_{\{p,q\}} \begin{bmatrix} U \end{bmatrix}^T \quad (2.74)$$

Um die lineare Basis in eine beliebige andere überzuführen, werden folgende Parameter verwendet:

$$\begin{bmatrix} U \end{bmatrix} = (1 + \rho\rho^*)^{-1/2} \begin{bmatrix} 1 & -\rho^* \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_i} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_i} \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

$$\rho = \frac{\tan \psi + i \tan \chi}{1 - i \tan \psi \tan \chi} \quad (2.76)$$

mit folgenden Parametern des neuen Polarisationszustandes:

χ : Elliptizitätswinkel

ψ : Orientierungswinkel

ϕ_i : Phase des neuen Polarisationszustandes, meist vernachlässigt ($\phi_i = 0$)

2.3.4 Streuvektor

Die Streumatrix kann zum Streuvektor umgeschrieben werden. Gebräuchlich sind zwei Darstellungen; der Vektor \bar{s}_l in der lexikalischen Basis und der Vektor \bar{s}_p in der Pauli-Basis:

$$\bar{s}_{4_l} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} & S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}^T \quad (2.77)$$

$$\bar{s}_{4_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} & S_{hh} - S_{vv} & S_{hv} + S_{vh} & i(S_{hv} - S_{vh}) \end{bmatrix}^T \quad (2.78)$$

Da davon ausgegangen werden kann, dass in der Natur die Reziprozität gilt, also $S_{hv} = S_{vh}$, kann der Streuvektor auf drei Elemente reduziert werden:

$$\bar{s}_{3_l} = \begin{bmatrix} S_{hh} & \sqrt{2}S_x & S_{vv} \end{bmatrix}^T \quad (2.79)$$

$$\bar{s}_{3_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} & S_{hh} - S_{vv} & 2S_x \end{bmatrix}^T \quad (2.80)$$

$$S_x = 0.5 \cdot (S_{hv} + S_{vh}) \quad (2.81)$$

2.3.5 Polarimetrische Dekompositionen

Dekompositionen sind mathematische Verfahren, die aus Streumatrix oder Kovarianz- oder Kohärenzmatrix Parameter extrahieren, die Informationen über die Art der Streumechanismen sowie über die Charakteristik von Streumechanismen geben. Die Parameterwerte können numerisch oder visuell ausgewertet und interpretiert werden.

Im einfachsten Fall besteht die Streumatrix aus einem dominanten und definierten Streumechanismus oder aus der kohärenten Summe von wenigen dominanten, definierten Streumechanismen. Der Beitrag des *speckle* ist vernachlässigbar schwach. Das Objekt ist somit ein «reiner Streuer» (*pure target*). In der Literatur wird diese Art von Streuern auch gerne als Punktziel *point target* bezeichnet. Die Bezeichnung ist nicht in allen Belangen ideal, da auch ein reiner Streuer durchaus eine Ausdehnung über mehrere Pixel aufweisen kann und somit keinen Punkt darstellt. Im gegensätzlichen Fall entsteht die Rückstreuung aus gleichwertigen, nicht dominanten Beiträgen (*speckle*). Die Verteilungsfunktion des komplexen Rückstreuwertes von solchen «verteilten Streuern» (*distributed targets*) lässt sich durch die komplexe Gaussfunktion beschreiben. In ABB. 2.16 sind die beiden gegensätzlichen Klassen von Rückstreuern modellhaft dargestellt.

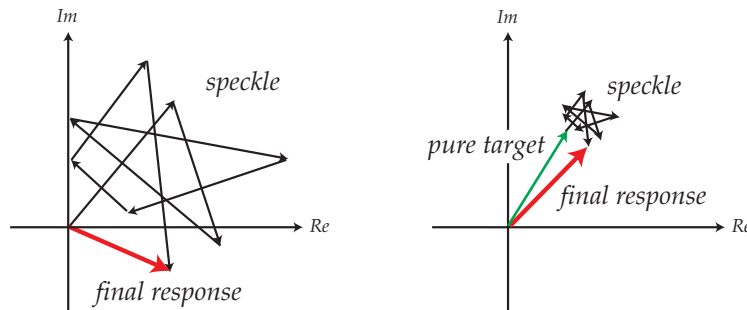


ABB. 2.16: Links: verteilter Streuer (*distributed target*), rechts: reiner Streuer (*pure target*).

Kohärente Dekompositionen

Kohärente Dekompositionen sind Dekompositionen der Streumatrix. Sie sind dann sinnvoll, wenn ein Objekt ein «reines Ziel» (*pure target*) darstellt oder die lokale Kohärenz hoch ist.

Pauli-Dekomposition

Diese kohärente Dekomposition beruht auf der Streumatrix in der linearen Polarisationsbasis [Cloude 96]:

$$\begin{bmatrix} S \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \beta \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \gamma \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \delta \cdot \begin{bmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

Die vier Pauli-Matrizen (auch Pauli-Basen genannt) sind orthonormal und spannen einen Vektorraum auf. Die Pauli-Matrizen sind physikalisch interpretierbar als:

$$\begin{aligned} \alpha &= (S_{hh} + S_{vv}) : \text{Oberflächenstreuung} \\ \beta &= (S_{hh} - S_{vv}) : \text{dihedrale Streuung} \\ \gamma &= (S_{hv} + S_{vh}) : 45^\circ \text{ um die } \textit{line of sight (LOS)} \text{ geneigter Dipol} \\ \delta &= i(S_{hv} - S_{vh}) : \text{für natürliche Streuer nicht realisierbar} \end{aligned}$$

Die Pauli-Dekomposition wird gerne für farbkodierte Darstellungen verwendet.

Inkohärente Dekompositionen

Ausgangspunkt inkohärenter Dekompositionen sind die Kovarianzmatrix $\begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix}$ und Kohärenzmatrix $\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}$. Diese Matrizen beschreiben die vorliegenden Streumechanismen statistisch. Die beiden Matrizen können durch ein räumliches oder zeitliches Mittel $\langle \dots \rangle$ geschätzt werden, was eine Reduktion des *speckle noise* erlaubt [Cloude 96].

Die Matrizen werden durch das dyadische Produkt des Streuvektors mit seiner Selbstadjungierten gebildet. Liegt der Streuvektor in der lexikalischen Basis vor, entspricht das Produkt der Kovarianzmatrix $\begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix}$, wird vom Streuvektor in der Paulibasis ausgegangen, entsteht die Kohärenzmatrix $\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix} = \bar{s}_l \cdot \bar{s}_l^\dagger \quad (2.83)$$

$$\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix} = \bar{s}_p \cdot \bar{s}_p^\dagger \quad (2.84)$$

Auch inkohärente Dekompositionen gehen von der Idee aus, dass das räumliche oder zeitliche Mittel der Kovarianz- oder Kohärenzmatrix durch die Addition verschiedener, möglichst unabhängiger Komponenten dargestellt werden kann:

$$\langle \begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix} \rangle = \sum_i p_i \begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix}_i \quad (2.85)$$

$$\langle \begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix} \rangle = \sum_i q_i \begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}_i \quad (2.86)$$

Eine solche Zerlegung ist nicht eindeutig, und daher existieren verschiedene Dekompositionsansätze. Die verschiedenen Dekompositionsverfahren versuchen, die Komponenten $\begin{bmatrix} C_3 \end{bmatrix}_i$ oder $\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}_i$ so zu wählen, dass sie physikalisch interpretierbar sind. Im einfachsten Fall beschreiben die einzelnen Komponenten wiederum elementare Streumechanismen. Dies ist aber nicht zwingend. Die verschiedenen Dekompositionen unterscheiden sich auch in der Zahl von Einzelkomponenten, in die die Kovarianz- oder Kohärenzmatrix zerlegt wird.

Dekomposition nach Cloude (Entropie- α -Dekomposition)

Die Dekomposition nach Cloude basiert auf der Eigenwertzerlegung der Kohärenzmatrix $\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}$ [Cloude 96].

$$\langle \begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix} \rangle = \begin{bmatrix} U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.87)$$

mit den Eigenwerten:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

und den Eigenvektoren:

$$\begin{bmatrix} U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_2^1 & u_3^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & u_3^2 \\ u_1^3 & u_2^3 & u_3^3 \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

wobei u_i^j die j -te Komponente des i -ten Eigenvektors bezeichnet. Die Eigenvektoren können wie folgt parametrisiert werden:

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{i\delta_i} & \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{i\gamma_i} \end{bmatrix}^T \quad (2.90)$$

Aus einem Eigenvektor kann wiederum die Kohärenzmatrix eines *pure target* $\begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix}_i$ gebildet werden. Die Gewichtung dieser drei *pure target* Mechanismen wird durch die Multiplikation mit dem jeweiligen Eigenwert erreicht:

$$\begin{bmatrix} \lambda_i T_3 \end{bmatrix}_i = \bar{u}_i \cdot \bar{u}_i^\dagger \quad (2.91)$$

Um die Interpretation zu vereinfachen, können aus den Eigenwerten und Eigenvektoren weitere Parameter abgeleitet werden:

- Die Entropie (H) ist die Summe der gewichteten Eigenwerte und beschreibt die Verschiedenartigkeit der im mittleren Streumechanismus addierten Mechanismen:

$$H = \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad , \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad (2.92)$$

$H = 1$ bedeutet, dass alle drei Mechanismen gleich stark vertreten sind, $H = 0$ entspricht nur einem Streumechanismus.

- Der Parameter α beschreibt die Art des mittleren Streumechanismus:

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (2.93)$$

$\alpha = 0$ bezeichnet trihedrale Streuer, $\alpha = \pi/4$ bezeichnet die Streuung eines um 45° geneigten Dipols und $\alpha = \pi/2$ steht für dihedrale Streuung.

- Der Parameter Anisotropie (A) beschreibt das Verhältnis der beiden nicht dominanten Mechanismen:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.94)$$

$A = 0$ bedeutet, dass die beiden nicht dominanten Mechanismen gleich stark sind, $A = 1$ trifft in dem Fall zu, in dem nur ein nicht dominanter Mechanismus vorhanden ist.

2.4 Radarsystem, Testgebiete und Daten

2.4.1 Radarsystem

Für die vorliegende Arbeit werden ausschliesslich Daten des *airborne SAR*-Polarimeters E-SAR verwendet, mit welchem über zwei Testgebieten (Hinwil, Schweiz und Krycklan, Schweden) Messflüge durchgeführt wurden. In TAB. 2.3 werden die wichtigsten Systemeigenschaften im Überblick dargestellt.

2.4.2 Testgebiet Hinwil

Das Testgebiet befindet sich im östlichen Schweizerischen Mittelland ($47^\circ 17' 20'' \text{N}$, $8^\circ 48' 30'' \text{E}$), vgl. ABB. 2.17.

Die Bodenbedeckung umfasst verschiedene Nutzungen, wie Siedlungsflächen, Industrieflächen, Landwirtschaftsland und zu einem geringeren Anteil meist kleinräumig strukturierte Waldflächen. Die Aufnahmestreifen wurden so gelegt, dass das Untersuchungsgebiet von Norden her beleuchtet wurde. Die Planung der Flugpfade wurde im Hinblick auf eine spätere tomographische Auswertung durchgeführt. Für die in dieser Arbeit verwendeten *quad-pol* P-Band-Daten wurden am 11. September 2006 12 Messflüge auf 11 Fluglinien durchgeführt. Eine Fluglinie hat dabei

Parameter	Testgebiet Hinwil	Testgebiet Krycklan
Sensorsystem	E-SAR (<i>experimental SAR</i>)	
betreibende Gesellschaft	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR	
Plattform	Dornier Do-228-212	
Mittenfrequenz f_c	335 MHz	350 MHz
Bandbreite B_{fm}	70 MHz	94 MHz
Pulsrepetitionsfrequenz	500 Hz	1000 Hz
Polarisation	2×2 -Streumatrix $[S]_{\{h,v\}}$ (lineare Polarisationsbasis)	
theoretische geom.	2.14 m	1.59 m
Auflösung <i>slant range</i>		
theoretische geom.		~ 4.0 m
Auflösung in Azimut		
mittlere Flughöhe ü. G.	~ 3900 m	~ 2000 m
Einfallswinkelbereich	$\sim 24^\circ - 53^\circ$	$\sim 30^\circ - 60^\circ$

TAB. 2.3: Spezifikationen des E-SAR-Systems

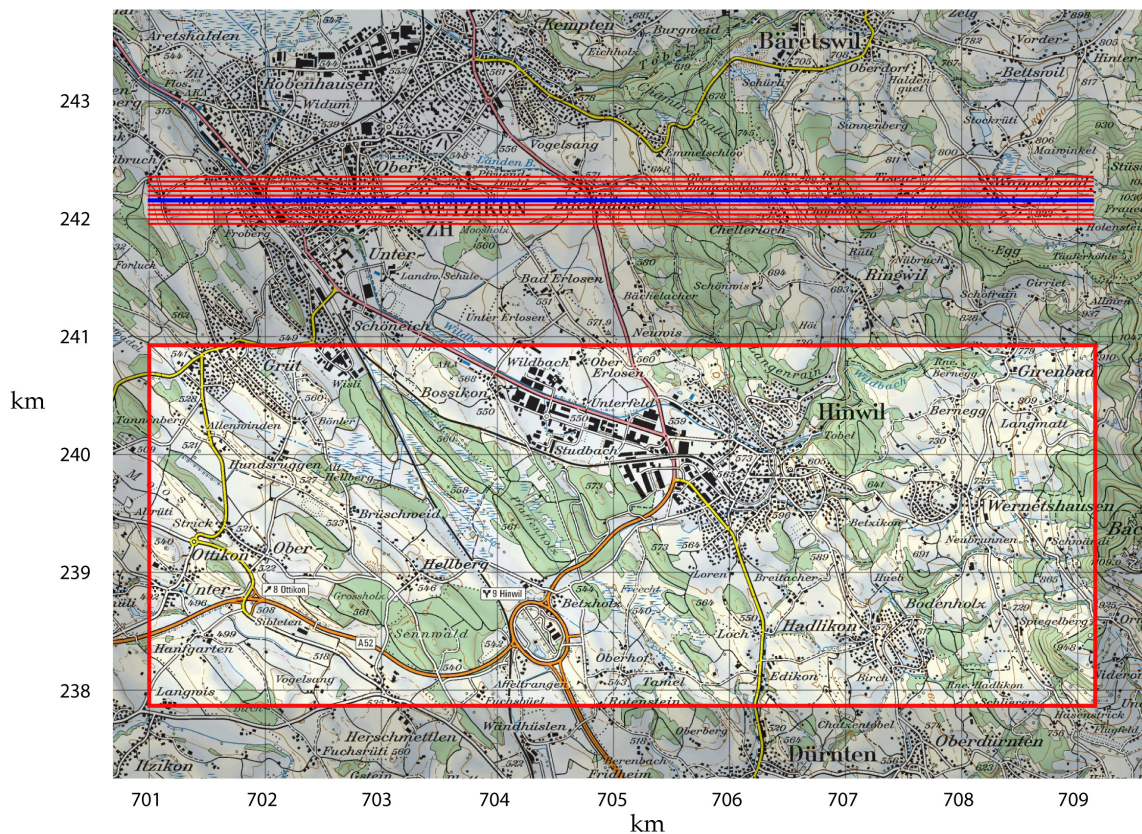


ABB. 2.17: Übersichtskarte über die Flugplanung, Testgebiet *Hinwil*. Die Referenz-Fluglinie ist blau hervorgehoben. Angaben in Schweizer Landeskoordinaten CH1903. Karte: Bundesamt für Landestopographie.

einen horizontalen und vertikalen Abstand von 40 m von der nächstliegenden (vgl. TAB. 2.4 und ABB. 2.18). Für die Überprüfung der Bildgeometrie wurden im Testgebiet verschiedene Reflektoren positioniert und mittels differentiellem GPS vermessen.

Datensatz	Track	Basislinie horizontal	Basislinie vertikal
06swisar0101x1	1	0 m	0 m
06swisar0102x1	2	80 m	80 m
06swisar0103x1	3	160 m	160 m
06swisar0104x1	4	240 m	240 m
06swisar0105x1	5	320 m	320 m
06swisar0106x1	6	400 m	400 m
06swisar0107x1	11	360 m	360 m
06swisar0108x1	10	280 m	280 m
06swisar0109x1	9	200 m	200 m
06swisar0110x1	8	120 m	120 m
06swisar0111x1	7	40 m m	40 m
06swisar0112x1	1	0 m	0 m

TAB. 2.4: Fluglinien der *full-pol* P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet *Hinwil* am 11.09.2006. Für die tomographische Auswertung bildet die Fluglinie 06swisar0109x1 den *master track*.

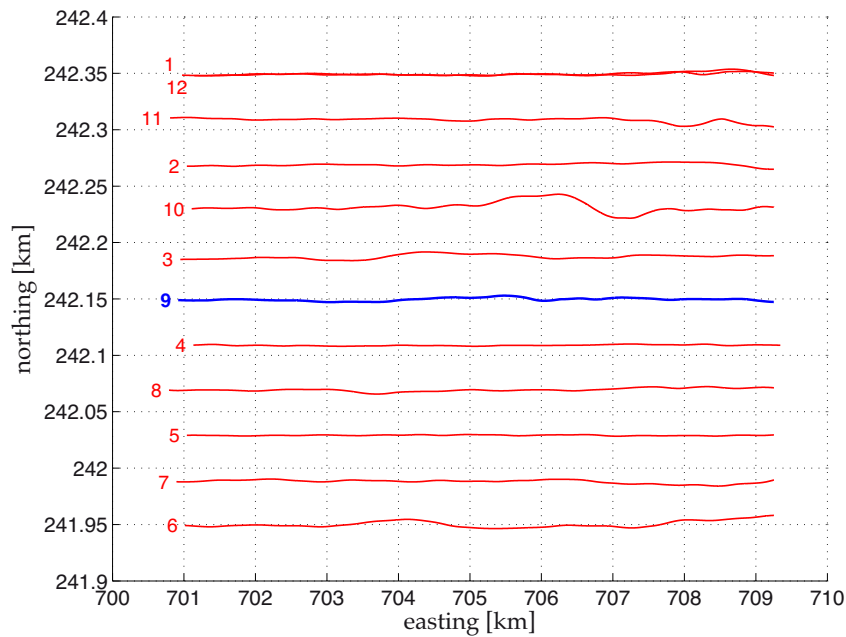


ABB. 2.18: Realisierte Flugwege, E-SAR P-Band, Testgebiet *Hinwil*, 11.9.2006.

2.4.3 Testgebiet Krycklan

Das Testgebiet im nördlichen Schweden ($64^{\circ}13'39''\text{N}$, $19^{\circ}49'50''\text{E}$) wird durch ausgedehnte Waldflächen charakterisiert. Die Gewinnung der in dieser Arbeit verwendeten P-Band-Daten fand im Rahmen der ESA BIOSAR 2-Kampagne an zwei Tagen statt. Am 14. Oktober 2008 wurde die Datenerhebung im Hinblick auf eine spätere interferometrische Auswertung geplant. Dazu wurde das Testgebiet auf parallelen Fluglinien überflogen. Das Testgebiet wurde aus zwei Blickrichtun-

gen je sechs Mal aufgenommen. Die Dimension des Aufnahmestreifens beträgt ca. $3 \text{ km} \times 10 \text{ km}$. Die Fluglinien sind in ABB. 2.19(a) gezeigt. Das Datenset wird als Testgebiet t01 bezeichnet.

Am 15. Oktober 2008 wurde ein ca. $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ grosser Ausschnitt desselben Testgebietes fünf Mal aus vier Blickrichtungen abgebildet. Alle Aufnahmen fanden in einem voll polarimetrischen Modus statt. Ein Überblick über die Datensätze findet sich in TAB. 2.5 und TAB. 2.6. Die Fluglinien sind in ABB. 2.19(b) gezeigt. Das Datenset wird als Testgebiet t02 bezeichnet.

Datensatz	Flugrichtung	Nominelle Basislinie
08biosar0101x1	313°	0 m
08biosar0103x1	313°	8 m links
08biosar0105x1	313°	16 m links
08biosar0107x1	313°	24 m links
08biosar0109x1	313°	32 m links
08biosar0111x1	313°	40 m links
08biosar0102x1	133°	0 m
08biosar0104x1	133°	8 m links
08biosar0106x1	133°	16 m links
08biosar0108x1	133°	24 m links
08biosar0110x1	133°	32 m links
08biosar0112x1	133°	40 m links

TAB. 2.5: Fluglinien der *full-pol* P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet *Krycklan* am 14.10.08. Die Dimension des abgebildeten Streifens beträgt ca. $3 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, aus [Hajsek 09].

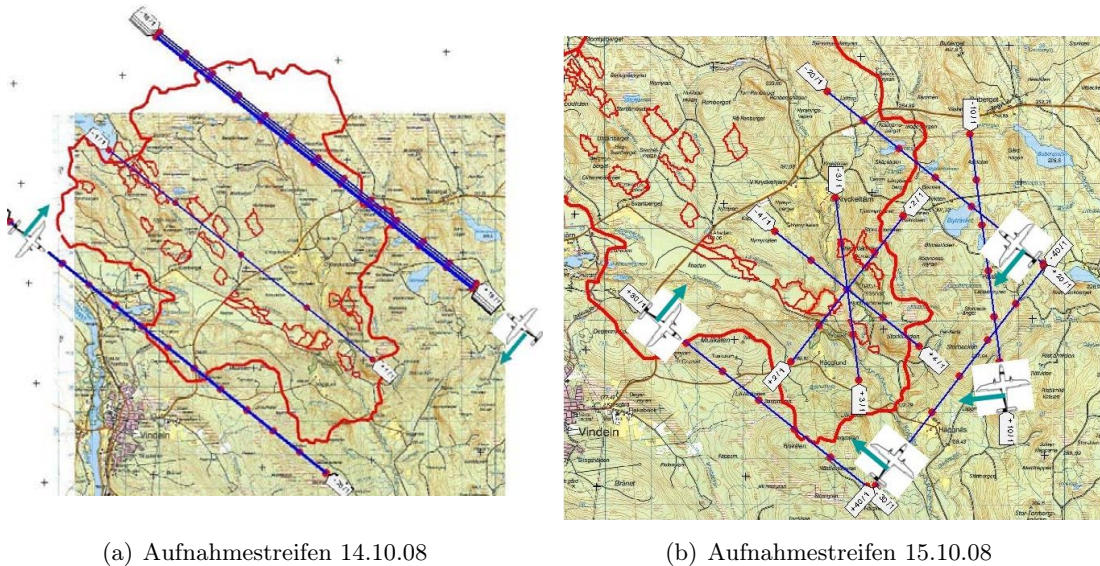


ABB. 2.19: Flugwege P-Band, Testgebiet *Krycklan*, 15.10.2008, aus [Hajsek 09].

Datensatz	Flugrichtung
08biosar0301x1	357°
08biosar0302x1	313°
08biosar0303x1	133°
08biosar0304x1	42°
08biosar0305x1	133°

TAB. 2.6: Fluglinien der *full-pol* P-Band E-SAR-Aufnahmen im Testgebiet *Krycklan* am 15.10.08. Die Dimension des abgebildeten Streifens beträgt ca. 3 km \times 3 km, aus [Hajsek 09].

2.4.4 Forstinventar

Die in dieser Arbeit im Zentrum stehende Vegetationsanalyse stützt sich auf Referenzdaten ab, die für das Testgebiet Hinwil im Rahmen des kantonalen Forstinventars im Oktober und November 2008 erhoben wurden. Für diesen Zeitraum sind Referenzdaten allerdings nur für ein Waldstück im Westen des Aufnahmestreifens (Sennwald) verfügbar. Das kantonale Forstinventar beruht auf einer Stichprobenerhebung in einem regelmässigen Raster mit einer Maschenweite 80 \times 300 m (80 m West-Ost, 300 m Nord-Süd). Für Rasterpunkte in Waldgebieten werden in einem Radius von 10 m um den Rasterpunkt Einzelbaumerhebungen durchgeführt. Ausgehend vom Mittelpunkt wird zusätzlich in einem Quadrat mit 50 m Seitenlänge die Bestandesstruktur beschrieben [Bau09]. Die Stichproben sind in ABB. 2.20 mit der in der Arbeit verwendeten Nummerierung dargestellt. Die originalen Bezeichnungen können der TAB. D.4 entnommen werden.

Da das Kantonale Forstinventar nur den Brusthöhendurchmesser (*diameter at breast height*, *dbh*) direkt misst, müssen weitere Parameter wie Stammvolumen, Baumalter und Höhe mittels allometrischer Beziehungen geschätzt werden. Für diese Arbeit wurde dafür die Methodik des Landesforstinventars (LFI) übernommen [Lischke 01]. Die dort verwendeten allometrischen Beziehungen gehen auf Hoffmann [Hoffmann 84] oder auf Pardé und Bouchon [Pardé 88] zurück.

Neben der Messung des Brusthöhendurchmessers werden weitere Parameter erhoben, die sich auf den Bestand beziehen oder auf einen Einzelbaum. Die wichtigsten erhobenen Parameter werden in der Folge kurz dargestellt, da sie im KAPITEL 3 auf einen Zusammenhang mit der gemessenen Rückstreuung untersucht werden. Die Parameterbeschreibung ist aus Aufnahmeanleitung Stichprobeninventur des Kantonalen Forstinventars entnommen [Bau09].

Die in dieser Arbeit berücksichtigten Parameter eines Waldbestandes sind Waldform, Entwicklungsstufe, Mischungsgrad, Schlussgrad und Schichtung. Alle diese Parameter sind nominalskalig. Die TAB. 2.7 gibt eine Übersicht über die berücksichtigten Bestandesparameter, TAB. 2.8

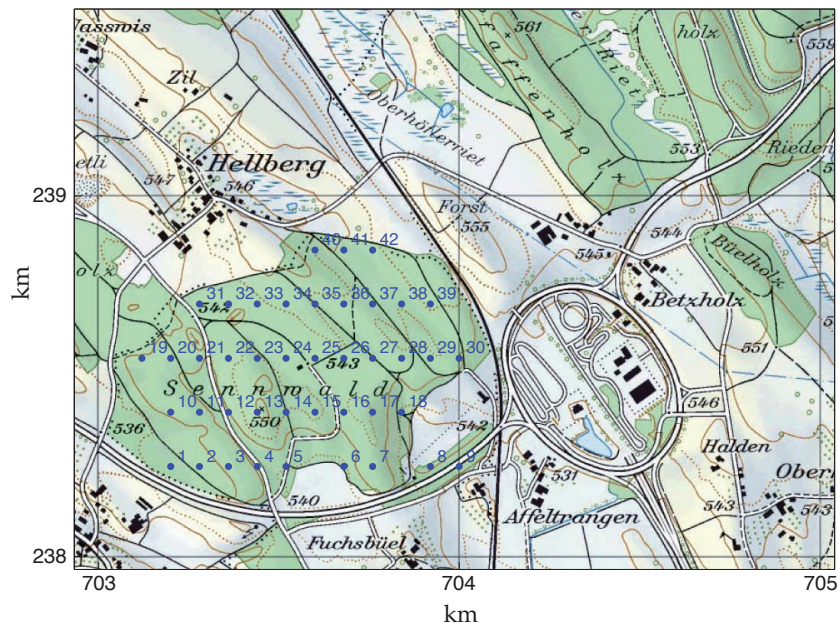
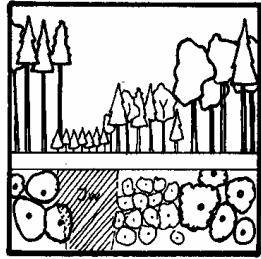
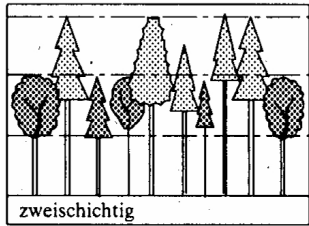
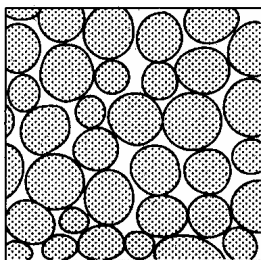


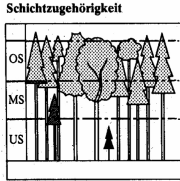
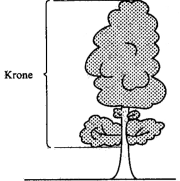
ABB. 2.20: Waldstichproben im Testgebiet *Hinwil*. Karte: Bundesamt für Landestopographie.

zeigt die neben dem Brusthöhendurchmesser und der daraus abgeleiteten Einzelbaumbiomasse in der Arbeit betrachteten Einzelbaumparameter.

Im Rahmen der BIOSAR-2-Kampagne in Schweden wurden 31 Waldbestände (*forest stands*) ausgeschieden, deren Flächen zwischen 2.4 und 26.3 ha betragen. Die beprobten Waldbestände sind in ABB. 2.21 in der Karte dargestellt. In den einzelnen Beständen wurde basierend auf einem regulären Gitter mit einer Maschenweite zwischen 50 und 160 m kreisförmige Stichprobenflächen (*plots*) beprobt. Für einen Waldbestand wird angenommen, dass bezüglich Wachstumsregime einheitliche Bedingungen herrschen. Die Gittermaschenweite wurde so gewählt, dass in jedem Waldareal mindestens 10 Stichproben gezogen werden konnten. Für die Stichprobenflächen wurde ein Radius von 10 m festgelegt. Innerhalb der Stichprobenkreise wurde der *dbh* und die Spezies aller Bäume registriert. Die Schwelle für die Erfassung eines Baumes lag für die Untersuchung bei einem *dbh* von 4 cm. Zusätzlich wurde die Höhe und das Alter zufällig ausgewählter, aber möglichst repräsentativer Einzelbäume innerhalb der Stichprobenfläche erfasst. Durchschnittlich wurden 1.5 Einzelbäume pro Stichprobenfläche erfasst. Für jede Stichprobenfläche wurden weitere Parameter erhoben wie z.B. Vegetationstyp und Bodentyp. Höhe, Volumen und Alter der beprobten Bäume wurden für die BIOSAR-Kampagne mittels allometrischer Beziehungen gemäss Söderberg geschätzt [Söderberg 86], [Söderberg 92], wobei die verwendeten Allometrien durch Messungen unterstützt und bis zu einem gewissen Grad korrigiert werden konnten. De-

Parametername	Skala	Beispiel / Erklärung	
Waldform	1 = Hochwald 2 = Niederwald 3 = Mittelwald 4 = Selve 5 = Plantage		Hochwald
Bestandesstruktur	10 = einschichtig 21-23 = mehrschichtig 30 = stufig 40 = Rottenstruktur		mehrschichtig
Entwicklungsstufe	1 = Jungwuchs 2 = Stangenholz 3 = schwaches Baumholz 4 = mittleres Baumholz 5 = starkes Baumholz 6 = gemischt	$d < 12\text{cm}$ $d = 12 - 30\text{cm}$ $d = 31 - 40\text{cm}$ $d = 41 - 50\text{cm}$ $d > 50\text{cm}$	
Mischungsgrad	1 = Nadel rein 2 = Nadel gemischt 3 = Laub gemischt 4 = Laub rein	91 - 100 % Nadelbäume 51 - 90% Nadelbäume 11 - 50% Nadelbäume 0 - 10% Nadelbäume	
Schlussgrad	1 = gedrängt 2 = normal 3 = locker 4 = räumig 5 = aufgelöst 6 = Gruppiert gedrängt 7 = Gruppiert normal 8 = Stufenschluss		normal

TAB. 2.7: Berücksichtigte Bestandesparameter des Kantonalen Forstinventars, aus [Bau09].

Parametername	Skala	Beispiel
Baumschicht	1 = Oberschicht (OS) 2 = Mittelschicht (MS) 3 = Unterschicht (US)	 Schichten
Kronenlänge	1 = langkronig 2 = mittelkronig 3 = kurzkronig	 langkronig
Kronenform	1 = rund 2 = leicht einseitig 3 = stark einseitig	

TAB. 2.8: Berücksichtigte Einzelbaumparameter des Kantonalen Forstinventars, aus [Bau09].

tails finden sich in [Hajnsek 09]. Im Gegensatz zu den Daten des Kantonalen Forstinventars im Testgebiet Hinwil wurden für das Testgebiet Krycklan keine Strukturparameter gemäss TAB. 2.7 oder TAB. 2.8 erhoben.

Grundsätzlich sind die Erhebungsmethoden für die beiden Testgebiet vergleichbar. Ein Vergleich der Erhebungsmethodik in den beiden Testgebieten findet sich in TAB. 2.9. Die Qualität der durch allometrische Beziehungen geschätzten Parameter sind einer direkten Messung unterlegen. Dennoch sind allometrische Beziehungen unverzichtbar, da sich Parameter wie zum z.B. das Stammvolumen einer direkten, nicht destruktiven Messung entziehen. In der Methodenbeschreibung für das Landesforstinventar (LFI) in [Lischke 01] wird für die Schätzung des Stammvolumens die Standardabweichung der Residuen auf 31.3% beziffert, wenn nur der Brusthöhendurchmesser (*dbh*) als unabhängige Variable und an die Wuchsregion (z.B. Mittelland, Alpen, Jura, Südalpen) angepasste Parameter in den allometrischen Funktionen verwendet werden. Im besten Fall erreicht die Standardabweichung der Residuen 26.3%, wenn lokale Bestandesparameter wie Waldstruktur etc. miteinbezogen werden. Für die Schätzungen im Rahmen der BIOSAR-2-Kampagne sind keine gleichwertigen Informationen über deren Qualität verfügbar. In der Grössenordnung dürften sie mit den Fehlern im Testgebiet Hinwil vergleichbar sein; in

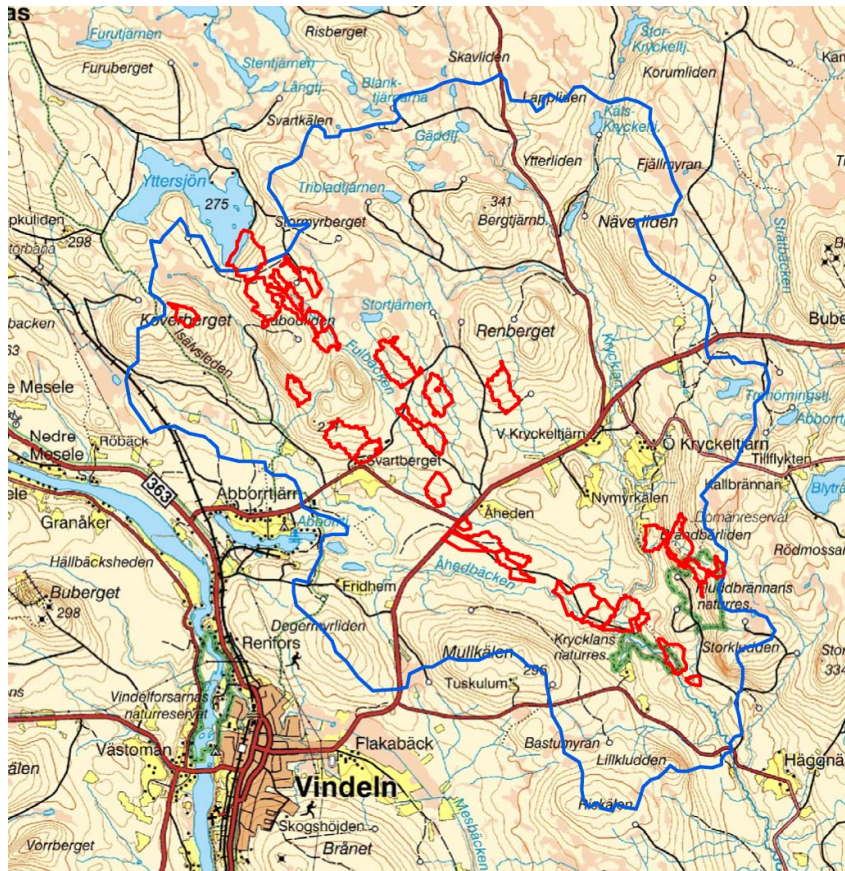


ABB. 2.21: Beprobte Waldbestände (*forest stands*) im Testgebiet Krycklan, aus [Hajnssek 09].

[Le Toan 11] wird der zu erwartende relative Fehler von allometrischen Untersuchungen typischerweise auf 25% beziffert.

Die Wachstumsparameter eines Baumes sind stark abhängig von der Vegetationszone und auch von lokalen Gegebenheiten, daher erfolgt die Parametrisierung der allometrischen Funktionen empirisch für eine begrenzte Region. Die Vergleichbarkeit der allometrischen Beziehungen für die beiden Testgebiete ist dadurch nicht gegeben, auch wenn die vorkommenden Spezies übereinstimmen.

2.5 Vegetationsstruktur und polarimetrische Messparameter

In diesem Kapitel werden Methoden entwickelt, die es ermöglichen, mit der Vegetationsstruktur die gemessenen polarimetrischen Parameter zu erklären.

	Hinwil	Krycklan
Maschenweite	80 m × 300 m	50 m × 50 m bis 160 m × 160 m
Radius der Stichprobenfläche	10 m	10 m
Verortung	Einzelbaumkoordinaten für alle Bäume in der Stichprobenfläche	Nur Koordinaten des Zentrums der Stichprobenfläche
Primäre Parameter erfasst für alle Bäume	Brusthöhendurchmesser (<i>dbh</i>) und Spezies	Brusthöhendurchmesser (<i>dbh</i>) und Spezies
Untergrenze <i>dbh</i> (Kluppschwelle)	12 cm	4 cm
Weitere Einzelbaumparameter	Lebenslauf, Nutzungsgrund, Schichtzugehörigkeit, Kronenlänge und -Form	keine weiteren Einzelbaumparameter aufgenommen
Weitere Bestandesparameter	Waldform, Entwicklungsstufe, Mischungsgrad, Schlussgrad, Bestandesstruktur, Neigung der Probestfläche, Nutzungskategorie, Probestflächenstatus, Waldrandfaktor	Bodenfeuchte für ausgewählte Waldbestände
Zeitpunkt der Inventur	Nov./Dez. 2008	13. - 17. Okt. 2008
Allometrische Beziehungen	Stammvolumen, Volumen der verwertbaren Äste ($d > 7$ cm), Gesamtvolumen, Baumhöhe	Gesamtvolumen, Stammvolumen, Astvolumen, Blätter/Nadelvolumen, Baumhöhe

TAB. 2.9: Vergleich der Erhebungsmethodik für Vegetationsparameter in den beiden Testgebieten.

2.5.1 Einleitung

Im Hinblick auf die ESA BIOMASS Mission wurde in [Le Toan 11] der aktuelle Stand der Technik bezüglich Biomasseschätzung mittels P-Band-Systemen zusammengefasst. Deutlich wird, dass im P-Band der Zusammenhang zwischen Rückstreuung im kreuzpolaren Kanal und Biomasse über verschiedene Testgebiete konsistent ist. Das bedeutet, dass sowohl Rückstreustärke und Art des Zusammenhangs in den untersuchten Testgebieten vergleichbar sind. Allerdings wird die Vergleichbarkeit in [Soja 13] relativiert. Als Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse wird darin folgendes festgestellt:

They all conclude that biomass and radar backscatter are correlated, but the presented functions and their regions of validity differ (due to different biomes and moisture conditions, different acquisition platforms, and changes in forest structure and surface topography). This means that the models derived in these papers usually have little or no application outside the studied test site. This is an obvious disadvantage when global biomass mapping is concerned.

Die Arbeiten von Le Toan et al. [Le Toan 11] und Soja et al. [Soja 13] analysieren verschiedene Untersuchungen von Waldstandorten im P-Band. In beiden Arbeiten werden die gefundenen Ergebnisse mittels linearer Regressionen parametrisiert und verglichen. Die einfachste Möglichkeit, die Rückstreuung $S_{i,j}$ mit der Biomasse B in Beziehung zu setzen, ist die lineare Regression erster Ordnung, die die Rückstreuung $S_{i,j}$ in einem polarimetrischen Kanal von zwei Parametern a_0 und a_1 abhängig macht:

$$B = a_0 + a_1 \cdot S_{i,j} \quad (2.95)$$

Die Rückstreuung $S_{i,j}$ kann die Rückstreuung eines beliebigen polarimetrischen Kanals sein, die Verwendung des kreuzpolaren Kanals hat sich für die Schätzung der Biomasse als verhältnismäßig robust erwiesen und findet daher weite Verbreitung. Die Bestimmtheit der Schätzung kann erhöht werden, wenn ein Polynom höherer Ordnung verwendet wird, wobei üblicherweise nicht über quadratische Polynome hinausgegangen wird:

$$B = a_0 + a_1 \cdot S_{i,j} + a_2 \cdot S_{i,j}^2 \quad (2.96)$$

Weiter ist es möglich, dieses Regressionsmodell auf mehrere polarimetrische Kanäle zu erweitern, um die Information in den anderen beiden polarimetrischen Kanälen zu nutzen. Diese Erweiterung ist dann sinnvoll, wenn davon ausgegangen wird, dass auch die Rückstreuung in den kopolaren Kanälen mit der Biomasse korreliert ist:

$$B = a_0 + a_1 \cdot S_{i,j} + a_2 \cdot S_{i,j}^2 + b_1 \cdot S_{i,i} + b_2 \cdot S_{i,i}^2 + c_1 \cdot S_{j,j} + c_2 \cdot S_{j,j}^2 \quad (2.97)$$

Diese Erweiterung kann eine Verbesserung der Schätzung mit sich bringen ([Le Toan 11], [Sandberg 11], [Ulander 11b], [Neumann 12]). So wird in [Ulander 11b] gezeigt, dass der geringste Fehler der Biomasseschätzung (~ 22 t/ha) im Testgebiet Krycklan durch die Verwendung einer linearen Regression 2. Grades und allen drei Kanälen erreicht wird. Mitchard widerspricht diesen Aussagen in [Mitchard 09], worin er anhand von L-Band-Daten feststellt, dass der kreuzpolare Kanal alleine die Biomasseschätzung mit weniger Störeinflüssen durch Topographie und Feuchtigkeit ermöglicht und daher die kopolaren Kanäle keine Verbesserung darstellen.

Durch Saatchi wird in [Saatchi 07] ein noch komplexeres Modell vorgeschlagen. Mit dem vorgestellten Modell ist es möglich, die Stammbiomasse unabhängig von der Kronenbiomasse zu parametrisieren. Das Modell beruht auf einer linearen Regression zweiten Grades, wobei die

einzelnen Terme zusätzlich mit dem Winkel der lokalen Steigung $\theta_{topo} = \theta_0 - \theta_i$ korrigiert werden, wobei θ_0 den Ellipsoid-Einfallswinkel zu einem bestimmten Pixel darstellt und θ_i den lokalen Einfallswinkel. Sind die beiden Winkel gleich, bedeutet das, dass das Gelände im untersuchten Punkt flach ist. Das Modell unterscheidet zwischen Stammbiomasse B_S und Kronenbiomasse B_C und hat folgende Form:

$$\begin{aligned} \log(B_C) = a_0 &+ a_1 \sigma_{HV}^0 \cos(\theta_{topo}) + a_2 (\sigma_{HV}^0 \cos(\theta_{topo}))^2 \\ &+ b_1 \sigma_{HH}^0 \sin(\theta_{topo}) + b_2 (\sigma_{HH}^0 \sin(\theta_{topo}))^2 \\ &+ c_1 \sigma_{VV}^0 \cos(\theta_{topo}) + c_2 (\sigma_{VV}^0 \cos(\theta_{topo}))^2 \end{aligned} \quad (2.98)$$

$$\begin{aligned} \log(B_S) = a_0 &+ a_1 \sigma_{HV}^0 \sin(\theta_{topo}) + a_2 (\sigma_{HV}^0 \sin(\theta_{topo}))^2 \\ &+ b_1 \sigma_{HH}^0 \cos(\theta_{topo}) + b_2 (\sigma_{HH}^0 \cos(\theta_{topo}))^2 \\ &+ c_1 \sigma_{VV}^0 \cos(\theta_{topo}) + c_2 (\sigma_{VV}^0 \cos(\theta_{topo}))^2 \end{aligned} \quad (2.99)$$

Es hat sich aber auch gezeigt, dass die kopolaren Kanäle (HH und VV) mit der Biomasse üblicherweise schwächer korreliert sind als der kreuzpolare Kanal, der auch mit der Volumenstreuung gleichgesetzt wird. Im kreuzpolaren Kanal stammt die Rückstreuung mit einiger Sicherheit aus dem Biomassevolumen oder von grösseren, gegenüber dem Sensor um 45° geneigten Dipolen. Kopolare Streuung tritt meistens mit einer Beteiligung einer oder mehrerer Reflexionen am Boden auf. Die Rückstreuung im HH-Kanal stammt hauptsächlich von der Streuung an den Stämmen mit einer Bodenreflexion, die Rückstreuung im VV-Kanal hat ihre Quelle in der direkten Bodenstreuung oder in der Volumenstreuung [Le Toan 11]. Diese Feststellung begründet, weshalb in dieser Arbeit hauptsächlich die Streumechanismen der Pauli-Dekomposition betrachtet werden. Deutlich ausgeprägte Zweifachreflexion (*double bounce*) beinhaltet im P-Band mit einiger Sicherheit Bodeninteraktion, die Oberflächenstreuung stammt eher direkt aus dem Vegetationsvolumen. Die direkte Oberflächenstreuung am Boden wird im P-Band als schwach angesehen, da die Bodenrauigkeit meist nicht ausreicht, um relevante Beiträge zum Sensor zurückzustreuen. Durch die Pauli-Dekomposition ist es möglich, die Rückstreuteile, die direkt und nur mit dem Vegetationsvolumen in Beziehung stehen, von solchen mit Bodeninteraktion zu trennen.

Nicht nur die Rückstreuung in den polarimetrischen Kanälen, sondern auch Parameter der polarimetrischen Dekompositionen oder Verhältnisse von Rückstreuintensitäten können mit der Biomasse korrelieren. Die Arbeit von Neumann et al. [Neumann 12] kommt auf der Datengrund-

lage des auch in dieser Arbeit betrachteten Testgebietes Krycklan zum Schluss, dass verschiedene abgeleitete Parameter (Dekompositionsparameter oder Kanalverhältnisse) sogar höher korrelieren als die Rückstreuung in einem Kanal alleine. Eine Zusammenfassung der Resultate der Arbeit von Neumann et al. ist in ABB. 2.22 in unveränderter Form wiedergegeben. Die Parameter α und HV/VV zeigen als Beispiele höhere Korrelationswerte als einzelne Kanäle. Unter den einzelnen Kanälen korreliert die kreuzpolare Rückstreuung (HV) am stärksten.

	Total \mathbf{C}		Ground \mathbf{C}_g		Volume \mathbf{C}_v	
	L	P	L	P	L	P
HH	0.58	0.33	0.20	0.41	0.62	-0.18
VV	0.39	-0.08	0.33	0.18	0.41	-0.50
HV	0.57	0.36	0.48	0.55	0.53	-0.03
HH+VV	0.41	0.03	0.18	0.21	0.51	-0.39
HH-VV	0.64	0.43	0.46	0.50	0.64	-0.23
abs(HHVV)	0.18	-0.12	0.06	0.08	0.34	-0.49
arg(HHVV)	0.12	0.61	0.16	0.65	0.06	-0.23
cor(HHVV)	-0.56	-0.67	-0.27	-0.56	-0.60	-0.75
H	0.56	0.26	0.48	0.23	0.34	0.44
α	0.46	0.75	0.43	0.69	0.45	0.67
$ \delta $	0.51	0.76	0.39	0.71	0.41	0.65
P_g	0.18	0.20	0.03	0.33	-0.17	0.18
P_c	0.45	0.14	0.23	0.38	0.36	-0.22
HV/(HH+VV)	0.43	0.20	0.47	0.16	-0.21	0.49
HV/VV	0.31	0.60	-0.22	0.47	0.00	0.62
SPAN	0.51	0.24	0.33	0.39	0.56	-0.29
Forest Height (h_v)	0.79	0.60				
Ground-Volume Ratio (μ)	-0.10	-0.63				

ABB. 2.22: Resultate nach Neumann. Die Spalten beinhalten die Korrelationskoeffizienten R zwischen der Biomasse und dem jeweiligen Parameter. \mathbf{C} steht für die vollständige Kovarianzmatrix, \mathbf{C}_g für den Anteil der Bodenstreuung und \mathbf{C}_v für den Anteil der Volumenstreuung. \mathbf{C}_g und \mathbf{C}_v wurden unter Verwendung interferometrischer Parameter geschätzt, aus [Neumann 12].

2.5.2 Analyse des Zusammenhangs zwischen Vegetationsstruktur und Rückstreuung

Diese Arbeit baut auf diesen Erkenntnissen auf. Es wird nicht versucht, die aktuellen semi-empirischen Modelle neu aufzubauen oder um einige Terme zu erweitern. Die verfügbaren Messparameter sind bereits erschöpfend auf ihren Zusammenhang hin mit der Biomasse untersucht worden. Das erste methodische Ziel ist es vielmehr, zu zeigen, warum sich die Parameterwerte zwischen Testgebieten so stark unterscheiden, dass die Parametrisierungen im Allgemeinen nicht übertragbar sind. Das Ziel für eine globale Biomasseinversion (oder Vegetationsuntersu-

chungen im weiteren Sinne mittels Fernerkundungsdaten) sollte sein, sich so weit wie möglich von der gebiets- und stichprobenabhängigen Parametrisierung zu lösen, indem allgemeingültige, physikalisch plausible Mechanismen zur Erklärung für Messgrößen verwendet werden und nicht nur statistische Zusammenhänge aufgezeigt werden. Die fehlende Übertragbarkeit von Modellparametrisierungen wird z. B. in [Hajsek 09] und [Soja 13] anhand der auch in dieser Arbeit verwendeten Daten des Testgebietes Krycklan gezeigt. Als Schlussfolgerung wird dort festgestellt, dass die Parametrisierung sich auch zwischen zwei Testgebieten im selben Aufnahmestreifen stark unterscheiden.

Die Unterscheidung zwischen Testgebieten und die Beschreibung der Abweichung von einem Modell beruhend auf messbaren biophysikalischen Parametern ist ein Schritt zur Verbesserung der Biomasseinversion, der auch durch die Integration von Termen höherer Ordnung oder die Vermehrung der erklärenden Variablen in bestehende Regressionsmodelle nicht erreicht werden kann. Wenn Faktoren bekannt sind, die die Korrelation zwischen einem Messparameter und der Biomasse beeinflussen, wird es möglich, unterschiedliche Testgebiete direkt miteinander zu vergleichen und aus dem Vergleich zusätzliche Informationen zu gewinnen. Für diese methodischen Ziele stehen die Biomassestruktur und Parameter, die die dielektrischen Eigenschaften beeinflussen, wie die Feuchtigkeit, im Zentrum.

Die in der Literatur verwendeten Modelle nutzen als Regressionsfunktionen Polynome unterschiedlichen Grades, um die Rückstreuung und die Gesamtbiomasse eines Standortes B in Beziehung zu setzen (in KAPITEL 3 folgt eine Übersicht über verschiedene Modelle). Dies bringt den Nachteil mit sich, dass der Vergleich zwischen Testgebieten einerseits wenig durchschaubar wird. Andererseits können die Polynomkoeffizienten nur schwierig direkt durch messbare Vegetationsparameter erklärt werden. Woodhouse et al. und Brolly et al. in [Woodhouse 06] und [Brolly 10] führen mit ihrer Darstellung der Ausdünnung als Parameter, der die Rückstreuung beeinflussen kann, eine solche Größe ein. Die Formulierung der Ausdünnung beruht auf Potenzfunktionen, die mit dem polynomischen Ansatz der Regression nicht in allen Fällen kompatibel ist.

Neu wird im Folgenden gezeigt, dass sich ein Modellansatz mit Überlegungen zur Wachstumsdynamik in Verbindung bringen lässt. Eine Formulierung der Regressionsmodelle, die auch schon implizit in [Le Toan 11], [Mitchard 09], [Soja 13] u. a. verwendet wird, kann mit der Ausdünnungsformulierung in Zusammenhang gebracht werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, Regressionsparameter aus Informationen über die Wachstumsdynamik direkt abzuleiten oder im

umgekehrten Fall Strukturparameter aus gefundenen Regressionsparametern zu invertieren. Das hier begründete Modell erhebt ausserdem den Anspruch, auf alle Testgebiete anwendbar zu sein, unabhängig von ihrer Wachstumsdynamik. Im Idealfall gelingt die Parametrisierung ohne Trainingsstichproben für jedes Gebiet aus Forstinventurdaten.

In die Parametrisierung des Modells fliessen die gemessenen *SAR*-Daten ein, aber auch Forstinventurdaten und Simulationsergebnisse des in dieser Arbeit vorgestellten Streumodells. Grundsätzlich beruht das Modell auf drei Haupt-Parametern, die im Sinne einer einfacheren Wiedererkennung Rückstreuparameter f , Einzelbaumrückstreuung r und Ausdünnungskoeffizient d genannt werden. Das Modell parametrisiert die gemessene Rückstreuung. Vorgesehen ist, die Rückstreuung in den drei Streumechanismen Volumenstreuung, Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion zu parametrisieren. Dies im Unterschied zu den bestehenden semi-empirischen Biomassemodellen [Le Toan 11], wo mehrheitlich die einzelnen Kanäle als erklärende Variablen einfließen oder Verhältnisse zwischen Kanälen. Die Verwendung von Streumechanismen hat den Vorteil, prinzipiell die selbe Information zu beinhalten wie die einzelnen Kanäle, aber bezüglich grundlegender Mechanismen einfacher interpretierbar zu sein.

In den drei Parametern des Modells kommen drei Herangehensweisen an das Thema «Biomasseuntersuchung mittels *SAR*-Daten» im weiteren Sinn zum Ausdruck: der Rückstreuparameter f entstammt der semi-empirischen Regressionsanalyse, die Einzelbaumrückstreuung r ist formal ein Parameter, der aus allgemeinen Streutheoremen oder Rückstreu-Modellierungen gewonnen wird, der Ausdünnungskoeffizient d ist die verdichtete Formulierung eines ökologischen Wachstumsmodells.

Die hier gezeigte Modellentwicklung dient nicht nur zum Vergleich zwischen Testgebieten und zur Ableitung weiterer bio-physikalischer Parameter. Ein Ziel ist es, die globale Abschätzung von Biomasse aus *SAR*-Daten zu ermöglichen, indem gebietsabhängige Einflussfaktoren so weit wie möglich quantifiziert und korrigiert werden können. Ein bekannter Rückstreuparameter f würde die Inversion der Biomasse aus *SAR*-Daten klar erleichtern. Durch Vergleich verschiedener Arbeiten (im KAPITEL 3 gezeigt) wird rasch deutlich, dass gerade dieser Parameter keine Konstante ist. Wie schon durch [Soja 13] formuliert, verunmöglicht dieser Unterschied einen Transfer der Parametrisierung von einem Testgebiet auf ein anderes. Für eine verlässliche Biomasse-Inversion ist es daher unabdingbar, diese Abweichungen zu quantifizieren, zu erklären und zu korrigieren, so dass die Parametrisierung verschiedener Testgebiete vergleichbar wird, im Idealfall sogar ei-

ne globale Parametrisierung gefunden wird, an die durch geeignete Datentransformationen und Korrekturverfahren die gebietsspezifischen Daten angepasst werden können.

Das wird erreicht, indem im Folgenden gezeigt wird, wie die drei Parameter f , r und d zusammenwirken und mit welchen Zusatzinformationen sie verlässlich geschätzt werden können. Die Anwendung dieser Erkenntnisse ist die Ableitung von optimierten Parametern, die eine zuverlässigere und übertragbare Biomasse-Inversion ermöglichen. Die in einem Testgebiet gemessenen Parameter werden durch diese Optimierung vergleichbar, eine robustere Inversion der Biomasse beruhend aus *SAR*-Daten wird ermöglicht. Die Optimierung ist auf Zusatzdaten angewiesen, die nicht allein durch Fernerkundungsmethoden erhoben werden können.

Im Zentrum der Arbeit steht also die Frage nach den Mechanismen, die zur gemessenen Rückstreuung führen. Das methodische Vorgehen dieser Arbeit ist in Form eines Flussdiagramms in ABB. 2.23 veranschaulicht. Die Grundannahme ist, dass die Mechanismen M1 bis M4 zum gemessenen Rückstreuparameter f führen, der durch die Methode S0 geschätzt wird. Die Mechanismen M1 bis M4 stellen also eine kausale Erklärung der gemessenen Rückstreuung dar.

Um diese Mechanismen zu beschreiben, wird mit einer allgemeinen Parametrisierung der Rückstreuung von Waldgebieten begonnen, im Flussdiagramm in ABB. 2.23 mit S0 gekennzeichnet. Die parametrisierte gemessene Rückstreuung beruht auf Mechanismen, die durch biophysikalische Parameter erklärbar sind (im Flussdiagramm mit M1 bis M4 gekennzeichnet). Dies im Gegensatz zu den Parametern eines semi-empirischen Regressionsmodells, die der Schätzung S0 entspricht, aber keine erklärenden Mechanismen miteinbezieht. Diese Abhängigkeit von grundlegenden Mechanismen wird im Folgenden gezeigt.

Die Herleitung der Parameterisierung S0 beginnt daher mit Überlegungen zum allgemeinen Verhalten von Streuern (Mechanismus M1). Die Einzelbaumrückstreuung kann aus simulierten Daten oder *SAR*-Daten geschätzt werden, was den Methoden S1a und S1b entspricht. Weiter wird die Wachstumsdynamik eines Waldes integriert (Mechanismus M2), die mittels des in KAPITEL 2.2.3 beschriebenen Ausdünnungskonzeptes nach Woodhouse et al. beschrieben wird. Das Ausdünnungsverhalten wird anhand des Ausdünnungskoeffizienten d beschrieben, der durch die Methoden S2a und S2b geschätzt werden kann.

Die Mechanismen M3 bis M5, die weitere Bestandesparameter, Einzelbaum-Strukturparameter und Störeinflüsse miteinbeziehen, werden explorativ anhand der Daten aus den Testgebieten untersucht.

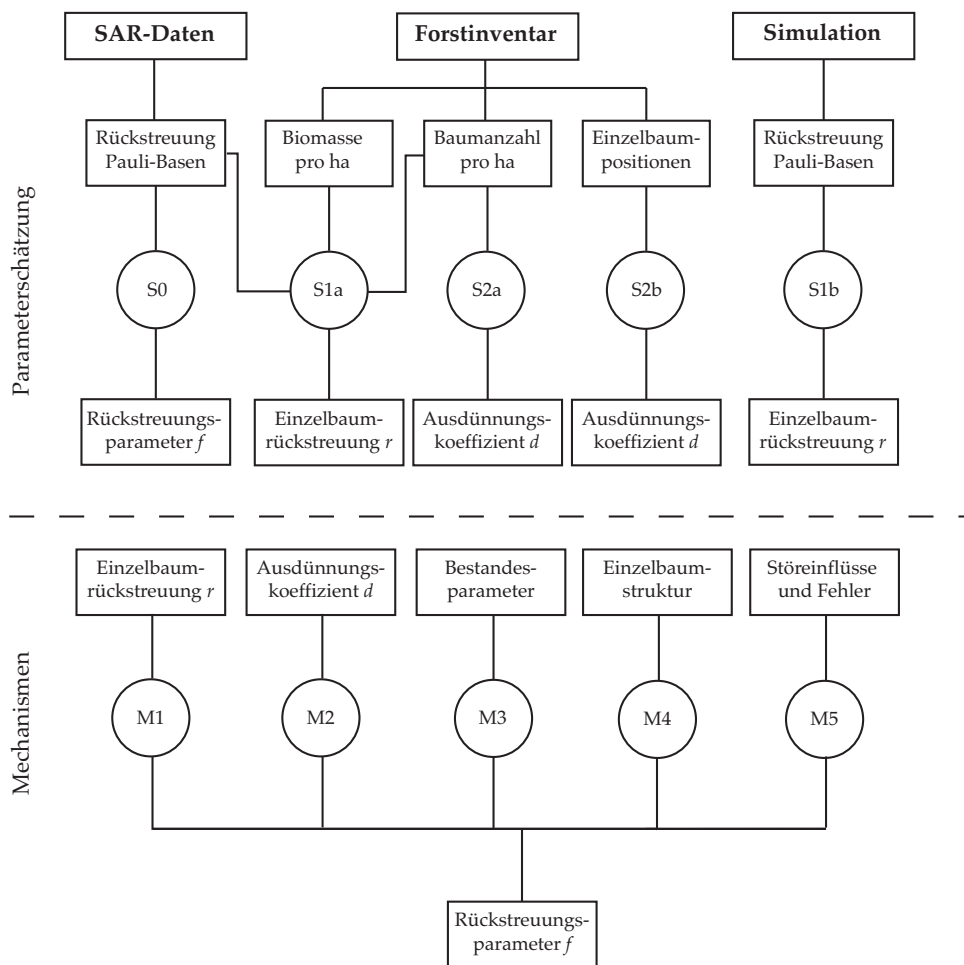


ABB. 2.23: Das Methoden-Flussdiagramm veranschaulicht das grundsätzliche methodische Vorgehen. Fünf Schätzmethoden und vier grundlegende Mechanismen werden in dieser Arbeit untersucht.

Einzelbaumrückstreuung und gemessene Rückstreuung (M1)

An die folgende Parametrisierung wird der Anspruch erhoben, vergangene und aktuelle Resultate mit hoher Übereinstimmung nachvollziehen zu können (vgl. KAPITEL 3). Die Verwendung von Potenzfunktionen ist an sich kein neues Verfahren. Neu ist die Auswahl und Herleitung der Parameter beruhend auf messbaren biophysikalischen Größen, was gegenüber der gebietsabhängigen semi-empirischen Parametrisierungen eine ursächliche Erklärung der gemessenen Werte ermöglicht. Dies stellt den Mehrwert der hier gezeigten Modellentwicklung dar.

Wenn davon ausgegangen wird, dass die von einem Wald gemessene Rückstreuung, insbesondere die im kreuzpolaren Kanal, aber prinzipiell auch in den anderen Streumechanismen, durch die Biomasse verursacht wird, kann für die Beschreibung der Rückstreuintensität ein allgemei-

nes Streutheorem angewandt werden. Das Mie-Streutheorem beschreibt in allgemeiner Form die Rückstreuung in Abhängigkeit der Streuerdimension. Anhand einer Kugel wird in ABB. 2.24 das Verhalten der Rückstreuung in Abhängigkeit von der Kugeldimension gezeigt.

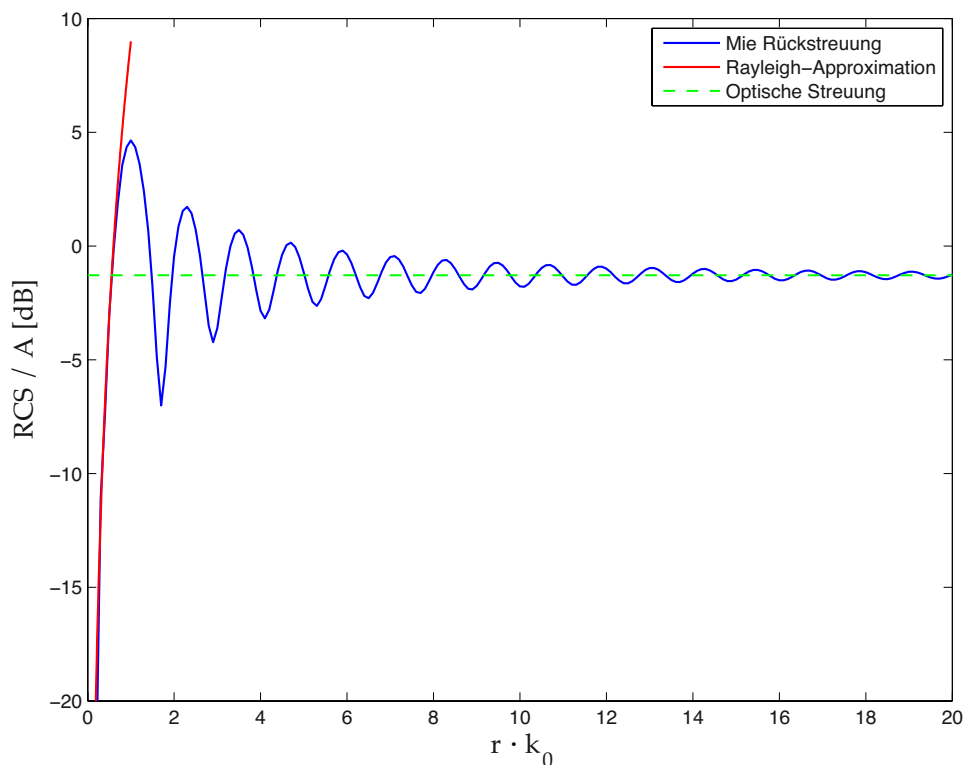


ABB. 2.24: Rückstreueffizienz (Rückstreukoeffizient (RCS) normiert über die Querschnittsfläche A) einer Kugel gemäss des Streutheorems nach Mie mit $\epsilon_r = 13 + 2.5i$. Für kleine Radien zeigt die Rayleigh-Approximation in Rot eine gute Übereinstimmung. In Grün ist die optische Streuung als Grenzfall für grosse Radien dargestellt [Mätzler 02].

Dieses allgemeine Streutheorem kann für die Erklärung der *SAR*-Rückstreuung ohne weiteres verwendet werden, wenn die Einzelbäume vereinfacht als individuelle Streuer betrachtet werden. Was unsicher ist, ist die genaue Dimension dieser vereinfachten Streuer und somit der Rückstreuquerschnitt. In [Smith 00] und [Smith-Jonforsen 07] wird die Radarrückstreuintensität I von Wäldern in tiefen Frequenzen anhand der Rayleigh-Approximation beschrieben. Die Rückstreuung ist demnach abhängig von der sechsten Potenz der Streuerdimension, also vom Quadrat des Volumens b :

$$I \propto b^2 \quad (2.100)$$

In diesen Arbeiten wird die Annahme damit begründet, dass die Streuerdimension in der betrachtenden Wellenlänge klein ist (in der ersten Arbeit [Smith 00] wird vor allem das VHF-Band betrachtet, in der zweiten [Smith-Jonforsen 07] auch das P-Band). Vorteil der Annahme ist, dass ein bekannter Zusammenhang zwischen Einzelbaumbiomasse und Rückstreuung es ermöglicht, eine Datentransformation vorzunehmen, die den Einfluss der Einzelbaumdichte reduziert, was noch gezeigt wird. Allerdings wird die Gültigkeit des Rayleigh-Streutheorems für die Wellenlänge des in dieser Arbeit betrachteten P-Bandes ($\lambda \approx 0.85$ m) hier in Frage gestellt. Wesentliche Teile von Bäumen (z.B. Stämme, primäre Äste) sind deutlich grösser als die Wellenlänge des P-Bandes oder haben zumindest zur Wellenlänge ähnliche Dimensionen. Daher wird in dieser Arbeit anhand von simulierten Einzelbaumrückstreuungen untersucht, in welcher Region des Mie-Streutheorems typische Einzelbäume im P-Band anzusiedeln sind.

In [Brolly 10] und [Brolly 12a] wird die beobachtete Sättigung der Rückstreuung, also der Verlust des Zusammenhangs zwischen Rückstreuung und Biomasse, teilweise auch durch diese Überlegungen zum Mie-Streutheorem erklärt. Sehr kleine Bäume könnten der Rayleigh-Approximation unterliegen. Wenn aber die Biomasse der Einzelbäume und somit auch die Dimensionen der Streuer zunimmt, wird der Rückstreuquerschnitt immer stärker durch die optische Approximation beschreibbar. Als Folge davon nimmt der Rückstreuquerschnitt relativ zum Biomassevolumen im Verlauf des Baumwachstums ab, was genau der beobachteten Sättigungserscheinung entsprechen würde. In dieser Arbeit wird anhand von simulierten Daten diese Vermutung überprüft, aber auch in *SAR*-Daten wird nach Belegen für eine sich ändernde Rückstreucharakteristik im Verlauf des Baumwachstums gesucht.

Es wird hier vorgeschlagen, die strikte Rayleigh-Annahme der Abhängigkeit von der sechsten Potenz zu ersetzen durch einen empirisch oder durch Simulation zu bestimmen Einzelbaumrückstreuungs-Parameter r . Der Maximalwert für r ist 2, die Rayleigh-Approximation. Als Minimalwert wird die optische Rückstreuung eines Zylinders angenommen, die direkt proportional ist zur Zylinderoberfläche. Es resultiert der Minimalwert für r von 0.5 (Quadratwurzel des Volumens):

$$\sigma \propto b^r \tag{2.101}$$

$$r \in [0.5 \dots 2] \tag{2.102}$$

Das Streutheorem erklärt die Rückstreuung anhand der Streuerdimension. In den meisten Forstinventur-Daten werden aber nicht die individuellen Streuerdimensionen erhoben (vereinfacht das Einzelbaumvolumen b), sondern die Biomasse eines Standortes oder einer Stichprobe B . Diese Biomasse B kann aber durch das Produkt von Einzelbaumbiomasse b und Baumdichte N dargestellt werden. Dadurch entsteht die Möglichkeit, die gemessene Rückstreuung direkt in Beziehung mit dem Einzelbaumvolumen b und der Baumdichte N zu setzen. Mit der Annahme der inkohärenten Summierung der Rückstreuung σ (die meist in einer normierten Form β^0 , σ^0 oder γ^0 behandelt wird) aller Einzelbäume kann die Rückstreuung mehrerer Einzelbäume beschrieben werden durch:

$$\sigma \propto b^r \cdot N \quad (2.103)$$

Der Zusammenhang mit der Gesamtbiomasse pro Fläche B wird dann hergestellt durch:

$$B = b \cdot N \quad (2.104)$$

$$\sigma \propto b^r \cdot N \quad (2.105)$$

$$\sigma \propto \frac{(b \cdot N)^r}{N^{r-1}} \quad (2.106)$$

$$\sigma \propto \frac{B^r}{N^{r-1}} \quad (2.107)$$

Diese Formulierung erlaubt es, Aus der Rückstreuung direkt die Biomasse zu invertieren, wenn der Rückstreukoeffizient r und die Baumanzahl N bekannt sind.

Schätzung der Einzelbaumrückstreuung (S1)

Obige Formulierung kann dazu verwendet werden, um die Einzelbaumrückstreuung aus *SAR*-Daten und Inventurdaten zu schätzen. Diese Methode ist im Flussdiagramm als S1a gekennzeichnet. Die Einführung einer Proportionalitätskonstanten c erlaubt die folgende Transformation in ein nichtlineares Modell. Dieses erlaubt die Schätzung des Exponenten r direkt aus *SAR*-Daten in Verbindung mit der Baumdichte N aus Forstinventurdaten:

$$10 \log_{10}(\sigma) = r \cdot 10 \log_{10}(B) - (r - 1) 10 \log_{10}(N) + c \quad (2.108)$$

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Einzelbaumrückstreuung aus der simulierten Rückstreuung eines Einzelbaumes abzuleiten, was im Flussdiagramm der Schätzmethode S1b entspricht. Diese Simulation wird im KAPITEL 3 gezeigt.

Einfluss der Ausdünnung auf die Rückstreuung (M2)

Bis hierhin erfolgt die Darstellung der gemessenen Rückstreuung als Funktion eines auf dem Streutheorem basierenden Parameters r und der Baumanzahl N . Woodhouse und Brolly erklären die in *SAR*-Daten beobachtete Sättigung andererseits aber auch unabhängig vom Streutheorem mit einer Änderung der Baumdicke N bei wachsendem Einzelbaumvolumen b , die mit Hilfe des Ausdünnungs-Konzepts ebenfalls parametrisierbar ist. In der Folge wird die Ausdünnung in die Parametrisierung der Rückstreuung integriert.

Die Wachstumsdynamik eines Waldes führt zu einem Zusammenhang zwischen Biomasse der Einzelbäume $b \text{ [m}^3\text{]}$ und der Baumdicke an einem Standort $N \text{ [ha}^{-1}\text{]}$, der sich durch Konkurrenz zwischen den Einzelbäumen um begrenzte Ressourcen (Licht, Wasser, Nährstoffe) erklären lässt. In [Woodhouse 06] und [Brolly 10] wird diese Ausdünnungsdynamik modellhaft durch eine einfache Funktion mit einem Exponenten d beschrieben, er wird in der Folge als Ausdünnungskoeffizient d bezeichnet. Nach dieser Funktion ist die Anzahl Bäume pro Fläche abhängig von diesem Ausdünnungskoeffizienten und dem Radius des Einzelbaumes. In dieser Arbeit wird diese Formulierung leicht abgewandelt. An Stelle des Radius wird das Biomassevolumen der Einzelbäume $b \text{ [m}^3\text{]}$ in einem Bestand als Basis verwendet (für die Modellentwicklung seien hier gleiche Biomassevolumen für alle Einzelbäume eines Bestandes angenommen). Diese Wahl der Bezugsgrösse ermöglicht es, die Gesamtbiomasse $B \text{ [m}^3\text{ha}^{-1}\text{]}$ als Produkt zwischen Baumdicke N und Einzelbaumbiomasse b darzustellen, was sich in der weiteren Formulierung als Vorteil erweisen wird, da auf das Einzelbaumvolumen direkt die Einzelbaumrückstreuung r angewendet werden kann. Die Ausdünnung wird, basierend auf Woodhouse und Brolly, wie folgt beschrieben:

$$N \propto b^{-d} \tag{2.109}$$

An dieser Stelle folgt ein Zwischenschritt. Für das einfachere Verständnis der weiteren Modellentwicklung und für die Interpretation der Modellparameter ist es von Vorteil, an Stelle absoluter Grössen relative zu verwenden. Diese Grössen beruhen auf festzulegenden Bezugsgrössen und werden in der Folge mit dem Index _{ref} versehen. Für die Gesamtbiomasse B , die Einzelbaumbiomasse b und für die Baumanzahl pro Fläche N werden solche Grössen eingeführt:

$$\delta b = \frac{b}{b_{\text{ref}}} \quad (2.110)$$

$$\delta N = \frac{N}{N_{\text{ref}}} \quad (2.111)$$

$$\delta B = \frac{B}{B_{\text{ref}}} \quad (2.112)$$

$$\delta \sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}} \quad (2.113)$$

Die Änderung der Anzahl Bäume pro Fläche kann nun einfach ausgedrückt werden als:

$$\delta N = (\delta b)^{-d} \quad (2.114)$$

Für die relative Änderung der Rückstreuung $\delta \sigma$ folgt:

$$\delta \sigma = (\delta b)^r \cdot (\delta N) \quad (2.115)$$

$$\delta \sigma = (\delta b)^r \cdot (\delta b)^{-d} \quad (2.116)$$

Die relative Änderung der Gesamtbiomasse eines Standortes B ist gegeben durch:

$$\delta B = (\delta b) \cdot (\delta N) \quad (2.117)$$

Aus (2.115) - (2.117) resultiert:

$$\delta b = (\delta B)^{\frac{1}{1-d}} \quad (2.118)$$

$$\delta \sigma = (\delta B)^{\frac{r-d}{1-d}} \quad (2.119)$$

Parametrisierung der Rückstreuung (S0)

Für eine experimentelle Überprüfung der bis hierhin gemachten Annahmen wird der Exponent in (2.119) durch einen Exponenten f substituiert, er wird in dieser Arbeit Rückstreuparameter genannt (vgl. ABB. 2.23). Der Rückstreuparameter f kann direkt aus den gemessenen Rückstreuwerten und der Gesamtbiomasse eines Standortes geschätzt werden:

$$f = \frac{r-d}{1-d} \quad (2.120)$$

Somit ist es möglich, die Rückstreuung durch die Ausdünnung einerseits und die Änderung des Rückstreuquerschnitts andererseits auszudrücken. Das **erste Modell** lautet, mit relativen und absoluten Grössen:

$$\delta\sigma = (\delta B)^f \quad (2.121)$$

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^f \quad (2.122)$$

Bis anhin wurde von einem konstanten Ausdünnungskoeffizienten d ausgegangen. Um aber einer eventuellen Veränderung des *thinning*-Verhaltens bei steigender Biomasse der Einzelbäume Rechnung zu tragen, werden zwei Modellansätze eingeführt, die sich auf die Gesamtbiomasse B und den substituierten Koeffizienten f beziehen:

1. Der Ausdünnungskoeffizient verändert sich in linearer Abhängigkeit von der Gesamtbiomasse.
2. Der Ausdünnungskoeffizient unterliegt einem exponentiellen Wachstum bezüglich Gesamtbiomasse.

Diese beiden Annahmen führen zu zwei Modellen, welche um jeweils einen Koeffizienten $c_{1,2}$ erweitert wurden. Das **zweite Modell** mit linearer Abhängigkeit lautet:

$$\delta\sigma = (\delta B)^{(f+c_1 \cdot ((\delta B)-1))} \quad (2.123)$$

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^{(f+c_1 \cdot ((\delta B)-1))} \quad (2.124)$$

Das **dritte Modell** mit exponentiellem Wachstum lautet:

$$\delta\sigma = \delta B^{(f \cdot (1+c_2)^{((\delta B)-1)})} \quad (2.125)$$

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^{(f \cdot (1+c_2)^{((\delta B)-1)})} \quad (2.126)$$

Während die Abhängigkeit des Parameters f von Rückstreuquerschnitt und Ausdünnung gegeben ist, ist die Bedeutung des Parameters σ_{ref} nicht *a priori* ersichtlich. Der Parameter beschreibt die Rückstreuung der frei wählbaren Bezugs-Biomasse. Ein Vorteil dieses Parameters ist die einfache Vergleichbarkeit verschiedener Waldgebiete. Als Erklärung des zu Grunde liegenden Mechanismus für den Parameter wird die unterschiedliche Feuchtigkeit des Holzes und/oder des Bodens favorisiert. Feuchtes Holz und feuchter Boden führen zu einer stärkeren Rückstreuung, da die Leitfähigkeit erhöht wird. Diese Änderung der Rückstreuung durch veränderte Leitfähigkeit entspricht der Bedeutung des Parameters σ_{ref} .

Die drei Modelle haben nun eine einheitliche Struktur: der erste Parameter σ_{ref} erklärt die dialektischen Eigenschaften, der zweite Parameter f die Biomassestruktur, der dritte Parameter im zweiten und dritten Modell $c_{1,2}$ die Änderung der Struktur. Die Gültigkeit der vorgeschlagenen Modelle werden in dieser Arbeit im KAPITEL 3 empirisch überprüft.

Die vorgeschlagenen Modelle sind vom Ansatz her vergleichbar mit den Modellen in [Le Toan 11] und [Soja 13], in denen die Biomasse die abhängige Variable darstellt.

Die Schätzung des Ausdünnungsparameters d (S2)

Dieser Abschnitt beschreibt die im Methoden-Flussdiagramm ABB. 2.23 als S2a und S2b bezeichneten Parameterschätzungen.

Der Ausdünnungsparameter d ist eine Grösse, die vom grundlegenden Verständnis her über die Forstinventurdaten zugänglich sein müsste. Die Schätzung wird aber dadurch erschwert, dass die Komplexität der Wachstumsdynamik in Waldgebieten sehr hoch ist. Um das Problem zu illustrieren, muss zuerst die Begrifflichkeit geklärt und die Problematik genauer erläutert werden.

Die Ausdünnung ist ein Konzept, das einen zeitlichen Verlauf impliziert. Gegebene Ausgangsbedingungen, hier vor allem die Baumanzahl pro Fläche verbunden mit einer Einzelbaumbiomasse, verändern sich in der Zeit durch Wachstum. Die Baumanzahl wird reduziert, wenn die Bäume an Volumen zulegen. Die Beobachtung eines Waldbestandes über die Zeit wird hier Ausdünnungslinie genannt. Drei Momentaufnahmen einer solchen Ausdünnungslinie sind in ABB. 2.25 dargestellt. Der Ausdünnungsparameter d bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Abnahme, das Produkt aus anfänglicher Baumanzahl und Einzelbaumbiomasse beschreibt die Ausgangsbiomasse pro Fläche. Ausdünnungslinien können verschiedene Ausgangsbedingungen, und somit unterschiedliche Biomasse pro Fläche aufweisen. Ebenso ist es möglich, dass sich die Stärke der Ausdünnung, der Ausdünnungsparameter d , sich unterscheidet.

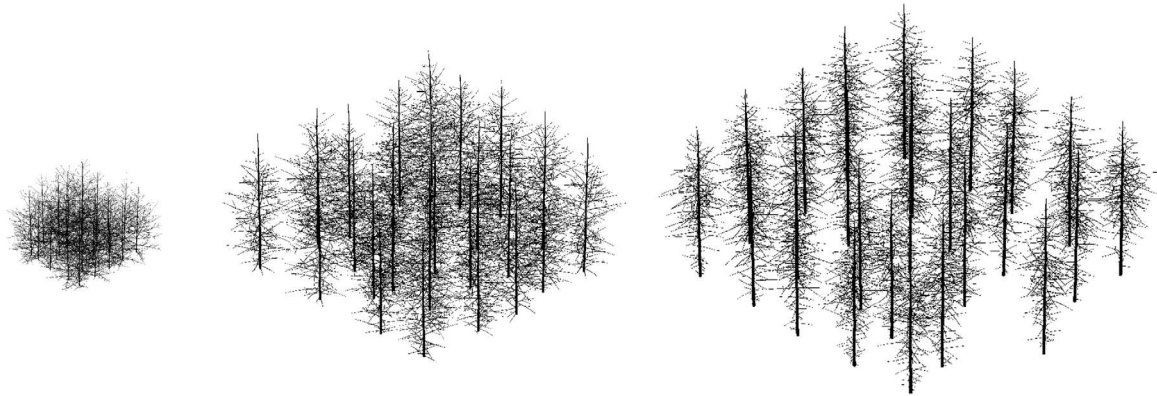


ABB. 2.25: Bildliche Darstellung einzelner Zeitpunkte einer Ausdünnungslinie mit dem zur Simulation vereinfachten Baummodell. In jeder Gruppe befinden sich 25 Bäume, das virtuelle Alter des Baummodells beträgt von links nach rechts 10 Jahre, 20 Jahre und 30 Jahre. Der Ausdünnungskoeffizient beträgt $d = 0.9$.

Eine Beprobung eines Waldes im Rahmen einer Forstinventur ist zeitlich gesehen eine punktuelle Untersuchung. Was beprobt wird, ist ein Zeitpunkt in einer Ausdünnungslinie. Nun können in einem Gebiet gleichartige Ausdünnungslinien in unterschiedlichem Altersstadium vorkommen. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn Teilflächen zeitlich versetzt abgeholzt werden und mit der selben Ausgangs-Baumanzahl wieder aufgeforstet werden. Das häufigere Szenario wird aber sein, dass in einem Waldgebiet verschiedene Ausdünnungslinien mit verschiedenen Ausgangsbedingungen vorkommen, die durch die Inventur beprobt werden. Wenn Ausdünnungsparameter aus Inventurdaten geschätzt werden sollen, stellt sich das grundsätzliche Problem, dass nicht bekannt ist, wie viele verschiedene Ausdünnungslinien im Gebiet vorkommen. Für eine Schätzung des Ausdünnungsparameters müssen zuerst verschiedene Ausdünnungs-Linien voneinander getrennt werden, was im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

Eine methodische Grundannahme wird vor der Methodenentwicklung gemacht, nämlich dass der Ausdünnungsparameter d durch Umweltbedingungen gegeben ist und somit in den räumlichen Dimensionen der hier untersuchten Testgebiete konstant ist. Die Konstanz des Ausdünnungsparameters ist keine zu starke Einschränkung, die Methodik erlaubt auch die Abschätzung der Variabilität des Ausdünnungsparameters für grössere Waldgebiete. Es gibt aber eine minimale Bezugsfläche, für die eine Konstanz des Ausdünnungsparameters angenommen wird. Als minimale Bezugsfläche gilt z. B. der Sennwald im Testgebiet Hinwil.

Für die Schätzung des Ausdünnungsparameters d werden in der Folge zwei Schätzverfahren zur Diskussion gestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden. Nach eingehender Prüfung finden sich diese oder vergleichbare Schätzverfahren nicht in der Literatur.

Schätzung aus Forstinventurdaten ohne Baumpositionen (S2a)

Sogar wenn der Ausdünnungskoeffizient für ein Waldgebiet und für alle darin vorkommenden Spezies als konstant angenommen wird, ist die Annahme, dass in ausgedehnten Waldgebieten die Baumanzahl für eine bestimmte Einzelbaumbiomasse konstant ist, kaum haltbar. Unterschiedliche Standortbedingungen oder unterschiedliche Pflanzdichten in bewirtschafteten Wäldern sind Faktoren, die die Ausgangs-Stammzahl beeinflussen.

Somit muss in der Regel von mehreren Ausdünnungslinien ausgegangen werden. Die Schätzung des Ausdünnungsparameters direkt aus Stammanzahl und mittlerer Biomasse ist im Allgemeinen nicht möglich, da nicht feststellbar ist, welche Stichproben zu einer bestimmten Ausdünnungslinie gehören.

Es wäre dennoch wünschenswert, den Ausdünnungskoeffizienten d aus Forstinventurdaten verlässlich zu schätzen, um die aus den *SAR*-Daten geschätzte Korrelation zwischen Rückstreuwerten und Biomasse zu korrigieren.

Daher wurde das Verfahren S2a entwickelt, das die Schätzung des Parameters d ohne Kenntnis der vorhandenen Ausdünnungslinienzahl ermöglicht. Das Verfahren ist ein iterativer Algorithmus, der *thinning detector* genannt wird. Der *thinning detector* zerlegt Forstinventurdaten in einzelne Ausdünnungslinien. Dafür werden die Baumdichte N und die Gesamtbiomasse B benötigt.

Die Entwicklung und die exakte Formulierung des Algorithmus ist in ANHANG C.5 gezeigt. Der Algorithmus beruht auf der Variablentransformation der Forstinventurparameter Baumdichte N und Gesamtbiomasse B . Nach der Transformation stellen Ausdünnungslinien Geraden dar. Ein optimaler Parameterwert für d wird iterativ gefunden, indem das Minimum an Geraden gesucht wird, die alle Stichproben abdecken. Ein weiteres Kriterium für den optimalen Parameter d ist die «Ladung» der gefundenen Linien, d. h. die Anzahl Stichproben, die auf den meistbesetzten Linien zu finden sind. Die grafische Darstellung des iterativen Verlaufs einer Parameterschätzung findet sich in ABB. 2.26. Das Minimum der Anzahl Linien wird durch mehrere d -Werte erreicht. Für $d = 0.9$ nimmt die Ladung innerhalb des d -Wert-Intervalls für 6 Ausdünnungslinien den höchsten Wert an.

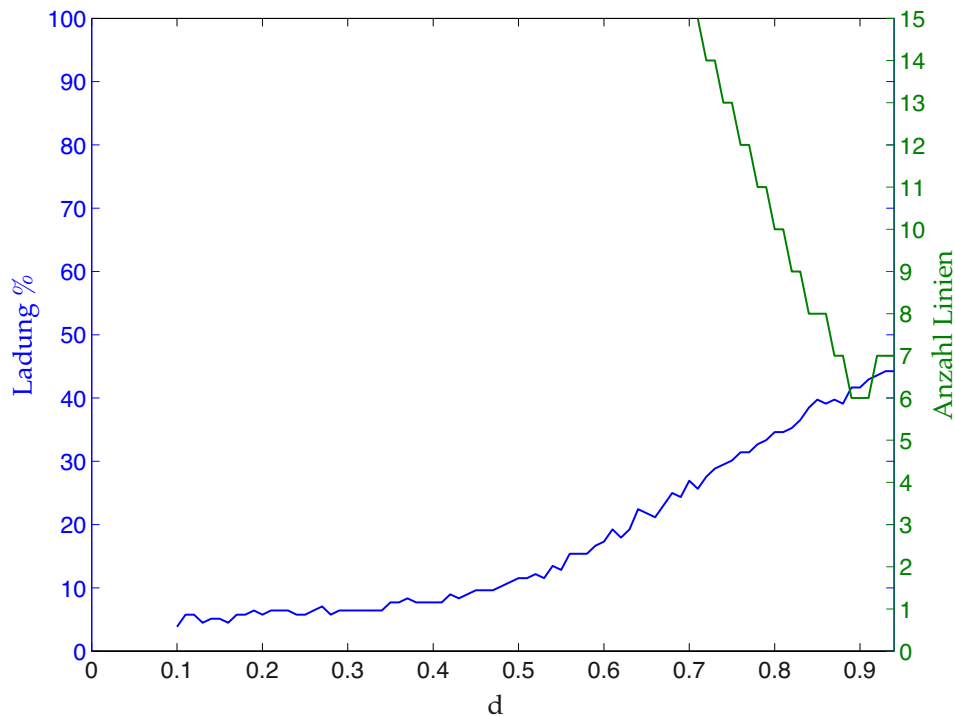


ABB. 2.26: Iterativer *thinning detector*, angewendet auf 12 simulierte Ausdünnungslinien mit $d = 0.9$ und unterschiedlichen Startwerten bezüglich Biomasse B . Das Verfahren findet den korrekten d -Wert, erkennbar an der maximalen Ladung und der minimalen Anzahl an benötigten Linien.

Im Verlauf der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass das Resultat des *thinning detectors* Mehrdeutigkeiten aufweisen kann. Für Ausdünnungen, die nahe bei $d = 1$ liegen, werden sowohl lokale Maxima für $d < 1$ als auch für $d > 1$ gefunden. Das Wachstum eines Waldbestandes mit $d > 1$ zeigt eine «inverse» Dynamik in dem Sinn, dass die Stichproben mit der grössten Gesamtbiomasse pro Fläche durch die kleinsten Bäume gebildet werden. Aus Inventurdaten ist eine solche Dynamik leicht zu erkennen ist. Somit ist es vertretbar, für den Algorithmus eine Grundannahme bezüglich Wachstumsdynamik zu definieren. Wenn von einem «normalen» Waldwachstum ausgegangen wird, in dem ältere Bäume auch die Stichproben mit grösserer Baumbiomasse bilden, kann der erwartete Wertebereich auf das Intervall $[0 \dots 1]$ eingeschränkt werden.

Eine Schlussfolgerung der hier dargestellten Eigenschaften der Ausdünnung und der Beeinflussung der Rückstreuung ist, dass der gemessene Rückstreuparameter f nur dann mit dem aus der Einzelbaumrückstreuung r und d abgeleiteten übereinstimmt (vgl. 2.120), wenn die verschiedenen Ausdünnungslinien in gleicher Art beprobt werden. Idealerweise decken die Stichproben

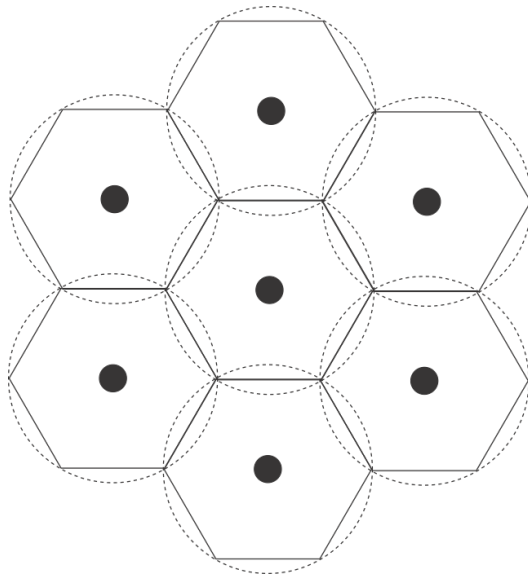


ABB. 2.27: Idealisierte Baumpositionen. Der mittlere Baumabstand wird aus dem mittleren Abstand zu den nächsten 6 Nachbarbäumen geschätzt.

einen grossen Bereich jeder Ausdünnungslinie ab. Der Einfluss des Ausdünnungskoeffizienten d auf den Rückstreuparameter f ist dann besonders gross, wenn d nahe bei der Einzelbaumrückstreuung r liegt. Für grössere Abstände zwischen r und d ist die Verzerrung durch die Beprobung unterschiedlicher Ausdünnungslinien geringer.

Schätzung aus Baumpositionen (S2b)

In Ergänzung zu S2a kann der Ausdünnungsparameter d auch direkt aus Forstinventurdaten geschätzt werden, was im Flussdiagramm mit S2b gekennzeichnet ist. Die Schätzung aus Forstinventurdaten ist dann möglich, wenn die exakten Baumpositionen erhoben werden, wie das im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) standardmässig geschieht. Daraus lässt sich ein mittlerer Abstand zwischen den Bäumen in Abhängigkeit der Einzelbaumbiomasse b berechnen. Der Mittlere Abstand wird berechnet, indem für jeden Baum der Abstand zu den nächsten sechs Nachbarn bestimmt und gemittelt wird. Die Wahl von sechs Nachbarbäumen folgt aus der dichtest möglichen Anordnung von Kreisen auf einer Ebene mit möglichst wenig Überlappung, wie in ABB. 2.27 dargestellt. Die mittleren Abstände werden anschliessend nach Einzelbaumbiomasse klassiert. Eine einfache Kurven-Anpassung an die Klassenmittelwerte liefert den gesuchten Ausdünnungsparameter d .

2.5.3 Weitere Einflussfaktoren

Die Korrelation zwischen einem Messparameter und der Biomasse unterliegt neben der Wachstumsdynamik weiteren Einflussfaktoren, in ABB. 2.23 mit M3 bis M5 bezeichnet. So ist es möglich, dass systematische Fehler auftreten, die sowohl die Schätzung der Biomasse als auch die Messung der Rückstreuung verzerren. Die Schätzung der Biomasse aus Feldmessungen unterliegt gemäss LeToan et al. [Le Toan 11] einem systematischen Fehler zwischen $\pm 15\% - 35\%$. Neben diesem systematischen Fehler können auch ungünstige Konstellationen dazu führen, dass die Schätzung von Messparametern unmöglich wird.

In der Arbeit von Soja et al. [Soja 13] wurde weiter gezeigt, dass die Integration der Topographie in die Regressionsmodelle die Korrelation verbessern kann. In dieser Arbeit wird die lokale Topographie zur Erklärung von Residuen ebenfalls untersucht.

Weiter wird explorativ versucht, Vegetations-Strukturparameter mit der gemessenen Rückstreuung in Beziehung zu setzen. So weit wie verfügbar wird auch die Bodenfeuchtigkeit auf einen Zusammenhang mit der Rückstreuung hin untersucht.

2.5.4 Vegetationsstruktur und polarimetrische Dekompositionsparameter

Es liegt nahe, dass Parameter inkohärenter polarimetrischer Dekompositionen, die unabhängig von der absoluten Kalibration der Rückstreuung sind und auf den Parameter σ_{ref} nicht ansprechen, ebenfalls abhängig von den Parametern r und d sind.

In [Neumann 12] wurde gezeigt, dass der Parameter α eine positive Korrelation mit der Bestandesbiomasse zeigt. Die Integration des Parameters ins Regressionsmodell erhöht in den durch Neumann gezeigten Resultaten den Korrelationskoeffizient deutlich.

Der in der genannten Quelle gezeigte lineare Zusammenhang zwischen Biomasse und α ist im untersuchten Gültigkeitsbereich sicher eine zutreffende Beschreibung, als grundsätzlicher Mechanismus kann der lineare Zusammenhang jedoch nicht aufrecht erhalten werden. Der bekannte Definitionsbereich der Entropie- α -Ebene führt dazu, dass für hohe Entropiewerte die α -Werte zu einem mittleren Wert konvergieren. Ein linearer Zusammenhang mag für tiefe Biomassewerte eine zutreffende Beschreibung sein, aber nicht für hochentropische Biomasseanordnungen. Der α -Parameter muss demnach eine klare Sättigung für hohe Biomassen zeigen oder zusammen mit der Entropie wieder abnehmen, wenn die Biomasse zunimmt.

Motiviert von diesen rein formalen Betrachtungen folgen daraus zwei sich ausschliessende Arbeitshypothesen, die auf eine verallgemeinerte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Dekompositionsparametern und Biomasse in einem weiteren Gültigkeitsbereich abzielen und in dieser Arbeit untersucht werden:

1. Entropie und α konvergieren für hohe Biomassewerte zu einem hohen Entropiewert mit mittlerem bis hohem α -Wert ($\sim 57^\circ$), modellhaft dargestellt für zunehmende Rückstreuungskomplexität in [Cloude 97]. Auch in [Praks 01] wird gezeigt, dass der α -Wert für grössere Stammvolumen konvergiert.
2. Entropie und α nehmen im Bereich tieferer Biomasse mit der Biomasse zu, was in [Praks 03] anhand von simulierten Resultaten und in [Neumann 12] anhand von E-SAR-P-Band Daten des auch in dieser Arbeit untersuchten Testgebietes Krycklan gezeigt wird. Diese Hypothese wird erweitert, indem für hohe Biomassewerte aber eine Abnahme der Werte gefordert wird.

Für die zweite Arbeitshypothese spricht die folgende Überlegung: Der mittlere Streumechanismus wird nicht durch die Gesamtbiomasse des Bestandes bestimmt, sondern durch den Anteil an sichtbarem Boden (tiefe α -Werte) einerseits und dem Vorhandensein von deutlich ausgeprägten Stämmen (Zweifachreflexion, hohe α -Werte). Wenn eine Ausdünnung mit zunehmender Einzelbaumbiomasse stattfindet, wird mehr Boden sichtbar. Der α -Wert und der Entropiewert kann also mit steigender Biomasse wieder kleiner werden, da immer mehr Boden sichtbar wird. Ausserdem tendieren alte Bäume zu einer strukturellen Vereinfachung. Die Äste konzentrieren sich auf die Kronenschicht, darunter dominieren astlose Stämme. Dieses Streuszenario ist weniger komplex als das Volumen ähnlich dimensionierter Streuer von Jungwuchs. Für die Anisotropie können analoge Überlegungen gemacht werden.

In Ergänzung der obigen zweiten Arbeitshypothese werden folgende weitere Hypothesen untersucht:

1. Die Entropie nimmt mit zunehmender Baumanzahl bzw. Biomasse pro Fläche zu, da die (schwache) Oberflächenstreuung des Bodens immer mehr durch weitere Streumechanismen ergänzt wird. Für grosse Bäume und damit verbundene niedrigere Bestandesdichten ist eine Abnahme der Entropie für hohe Einzelbaumbiomassen und niedriger Baumanzahl zu erwarten.
2. Der α -Parameter steigt mit steigender Biomasse vorerst an, da die Zweifachreflexion an den grösser werdenden Stämmen stärker wird. Lichtet sich der Bestand wieder, tritt häufiger ei-

ne Bodeninteraktion ein, was auch ungeradzahlige Reflexionen begünstigt. Der α -Parameter nimmt also für höhere Biomassen wieder ab.

3. Die Anisotropie widerspiegelt die Komplexität des Streuszenarios. Sind alle drei Mechanismen in ähnlichem Ausmass vertreten oder nur ein Mechanismus relevant, ist die Anisotropie tief. Dieser Fall kann eintreten, wenn komplex strukturierte Einzelbäume (v. a. Jungwuchs) in hoher Dichte auftreten. Dies bedeutet, dass in Folge des Baumwachstums die Anisotropie zunimmt. Es wäre aber auch denkbar, dass bei steigendem Einzelbaumvolumen die Zweifachreflexion am Stamm die anderen Mechanismen deutlich übertrifft und somit die Anisotropie auch für alte Bäume tief ist.

Neben dem Zusammenhang zwischen den Parametern der inkohärenten Dekomposition und der Biomasse/Bestandesdichte werden noch weitere Dekompositionsparameter untersucht. Das Vorgehen dabei ist explorativ, insbesondere wird versucht, Zusammenhänge zwischen Dekompositionsparametern und Stammanzahl oder Einzelbaumbiomasse zu finden, da diese beiden Parameter direkt mit der Ausdünnung verknüpft sind.

2.5.5 Methodisches Vorgehen

Im folgenden KAPITEL 3 wird die erarbeitete Methodik dazu genutzt, um anhand der verfügbaren Daten der beiden Testgebiete oder mit Hilfe von Simulationen Mechanismen zu beschreiben, die zur gemessenen Rückstreuung führen.

Im Unterschied zur Darstellung der Methodik, worin zuerst ein Streumodell entwickelt wurde, wird für die Resultatgewinnung von den *SAR*-Daten ausgegangen. Mit Hilfe der entwickelten Methodik werden Mechanismen beschrieben, die in der Vegetationsstruktur oder anderen Standortfaktoren begründet sind, welche die gemessene Rückstreuung beeinflussen. Unterschiede zwischen den untersuchten Testgebieten werden ebenfalls mit Hilfe von nachvollziehbaren Mechanismen erklärt. Das neu entwickelte *full wave*-Streumodell wird anschliessend auf Grund der Erkenntnisse aus der Analyse der Daten aus den beiden Testgebieten möglichst naturnah parametrisiert. Das Ziel ist es, möglichst realitätsnahe *SAR*-Datenprodukte zu simulieren. In diesen Produkten lassen sich die Auswirkungen von strukturabhängigen Mechanismen auf die Rückstreuung unter kontrollierbaren Bedingungen analysieren.

3 Resultate

Das Ziel der hier in Form von Resultaten dargestellten Untersuchungen ist, die physikalischen Mechanismen aufzuzeigen, die den gemessenen Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse beeinflussen.

In Erweiterung der schon bestehenden Methoden und Untersuchungen wird gezeigt, dass die Schätzung der Biomasse aus *SAR*-Daten durch die Berücksichtigung verschiedener Parameter und Mechanismen verbessert werden kann. Weiter werden in der Literatur erhebliche Unterschiede im Rückstreuverhalten verschiedener Testgebiete beobachtet. Diese Unterschiede, die eine gebietsabhängige Parametrisierungen der Biomasse-Inversionmodelle nach sich ziehen, lassen eine operationelle globale Biomasseschätzung aus *SAR*-Daten ohne umfangreiche Felddaten im Moment unmöglich erscheinen. Um dies zu ermöglichen, leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag, indem diese Unterschiede erklärt und parametrisiert und so weit wie möglich korrigiert werden. Das Ziel ist es, auf eine «globalisierte» Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Biomasse und Rückstreuung hinzuarbeiten und aufzuzeigen, weshalb die Messwerte verschiedener Waldgebiete schlecht vergleichbar sind.

Um die in dieser Arbeit gezeigten Resultate an bestehende Erkenntnisse anzuknüpfen, wird im ersten Abschnitt gezeigt, dass die in KAPITEL 2.5.2 vorgeschlagenen Modelle dazu benutzt werden können, um die semi-empirischen Modelle verschiedenster Untersuchungen zu vergleichen. Der Anspruch ist es, mit den vorgeschlagenen Modellen alle Resultate der in Betracht gezogenen Arbeiten mit hoher Übereinstimmung nachzuvollziehen.

Nachdem dieser Schritt gelungen ist, werden diese Modelle auf die Daten der beiden Testgebiete Hinwil und Krycklan angewendet. Da die Daten des Testgebietes Krycklan schon in mehreren Arbeiten untersucht wurden, besteht nicht die Absicht, die Biomasse-Inversionsqualität der in der Literatur gezeigten Modelle zu übertreffen. Vielmehr werden die Residuen, die nach Parametrisierung der in dieser Arbeit vorgestellten Modelle beobachtet werden, mittels physikalisch nachvollziehbarer Mechanismen erklärt. Die Variablen sind vegetationsbezogen und standortgebunden. So wird der Einfluss der Topographie sowie die Strukturiertheit der Waldbestän-

de untersucht. Diese Beschreibung kann dazu verwendet werden, um diese Störeinflüsse in den Rückstreuwerten zu unterdrücken, was die Qualität einer folgenden Biomasseinversion erhöht.

Die Unterschiede in der Rückstreuung, die zwischen den Testgebieten auftreten, werden anschliessend untersucht. Dazu wird das Schwergewicht auf die Analyse der Ausdünnungsdynamik gelegt, wobei die in KAPITEL 2.5.2 gezeigte Methodik angewandt wird. In diesem Teil werden zum ersten Mal auch Resultate der durch die in KAPITEL 2.1 angepasste DDA simulierte Rückstreuung miteinbezogen.

Da die Strukturparameter aus Forstinventurdaten gut verfügbar sind, aber auch aufwändige Felderhebungen bedingen, wird gezeigt, dass sich Strukturparameter auch mittels Parametern der inkohärenten Dekomposition in Verbindung bringen lassen. Das Potential einer Verbesserung der Biomasseinversion durch Integration von Dekompositionsparametern wird untersucht.

Die gezeigten Resultate werden anschliessend mit den schon bestehenden Resultaten aus [Hajnsek 09], [Neumann 12] und [Soja 13] zum Testgebiet Krycklan in Beziehung gesetzt und abgegrenzt.

Der zweite Teil der Resultatsdarstellung widmet sich dem in KAPITEL 2.2 beschriebenen Streumodell. Aus den Erkenntnissen der Untersuchung der beiden Testgebiete werden Modellparameter abgeleitet. Die damit simulierten *SAR*-Daten simulierter Waldbestände werden anschliessend den *SAR*-Daten der beiden Testgebiete gegenübergestellt. Es wird gezeigt, dass die Modellierung zu realitätsnahen Ergebnissen führt, wenn realitätsnahe Parameter verwendet werden. Die Simulation erlaubt die Abschätzung der Auswirkungen verschiedener dielektrischer Eigenschaften und Struktur.

Beim Vergleich der gezeigten Resultate mit der Literatur sind einige Punkte zu beachten. So wird die Rückstreuung eines Kanals von radiometrisch kalibrierten *SAR*-Daten üblicherweise in einer radiometrisch normierten Form und mit der Pseudoeinheit dB dargestellt. Da aber in diesem Kapitel durchwegs die Rückstreuung in Streumechanismen der Pauli-Dekomposition, und nicht in Kanälen dargestellt wird, wird auch die korrekte Normierung der Intensitätswerte in den einzelnen Mechanismen vorgenommen. Die Normierung ist notwendig, um die Gesamtintensität des Streuvektors zu erhalten. Dies führt aber dazu, dass die Intensität der Volumenstreuung um den Faktor $\times 2$ ($\sim +3$ dB) höher liegt als die Werte eines kreuzpolaren Kanals HV oder VH oder des Mittelwertes zwischen HV und VH.

Um eine Vergleichbarkeit mit der Literatur zu gewährleisten, ist die Bezugsgrösse für Modellanpassungen, wenn nicht anders erwähnt, der Mittelwert von Stichproben. In Fällen, wo mit

starkem Rauschen oder vielen Ausreissern zu rechnen ist, wird der Median als Bezugsgrösse verwendet.

Geschätzte Parameter werden mit ihrem Standardfehler angegeben. Anhand des Bestimmtheitsmasses R^2 und des reduzierten χ^2 -Wertes kann die Anpassungsgüte beurteilt werden. Die Definitionen der Masse finden sich in ANHANG D.4.

3.1 Vergleich bestehender Modelle

Verschiedene Untersuchungen konnten bisher einen Zusammenhang zwischen der Intensität der Rückstreuung und der Biomasse belegen [Le Toan 11]. In TAB. 3.1 sind Untersuchungen zusammengestellt, welche mittels semi-empirischer Modelle den Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse beschreiben. Die Auswahl ist dabei auf Untersuchungen eingeschränkt, die SAR-Daten im P-Band verwenden.

Die Aussagen dieser Modelle werden in ABB. 3.1 bezüglich des kreuzpolaren Kanals (Volumenstreuung) miteinander verglichen. Für diesen Vergleich konnten nur Arbeiten herbeigezogen werden, welche ausschliesslich den kreuzpolaren Kanal als Variable verwenden und in denen die Modellparameter offengelegt wurden bzw. deren Ableitung aus grafischen Darstellungen möglich ist.

Aus diesem Vergleich wird deutlich, dass die publizierten Modelle sich grundsätzlich ähnlich sind, aber anhand der auftretenden Sättigung (Abflachung der Kurve bei zunehmender Biomasse) grob in zwei Gruppen unterteilt werden können. Die erste Gruppe weist unterschiedlich starke Sättigungen auf, die Kurven sind streng monoton wachsend. In der zweiten Gruppe tendieren die Kurven bei zunehmender Biomasse zu einer Abflachung und nehmen nahezu konstante Werte an oder fallen leicht ab.

Um die verschiedenen empirischen Ansätze zu vereinheitlichen und somit einen besseren Vergleich zwischen verschiedenen Testgebieten zu ermöglichen, wird nun versucht, die Aussagen der verschiedenen Modelle mittels der in KAPITEL 2.5.2 vorgestellten Modelle nachzubilden. Dazu werden in einem ersten Schritt die in (2.110) – (2.113) definierten Bezugsgrössen B_{ref} und σ_{ref} definiert. Die Biomasse-Bezugsgrösse B_{ref} kann frei gewählt werden, die Bezugsgrösse der Rückstreuung σ_{ref} ergibt sich aus dieser Wahl. In ABB. 3.2 wird deutlich, dass nach diesem

Nr.	Autoren	System	Bänder	Θ	Vegetation	Biomasse	Modell, Grad	unabh. V.	abh. V.	R^2	Bemerkungen	Param.
1	LeToan et al. [LeToan 92]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	40° 50°	– Kiefer	5 – 105 t/ha	linear, 1	P-X, P-HH, P-VV (nat.)	Biomasse	P-X (0.95)	Uniforme Waldflächen (Pflanzung)	grafisch
2	Dobson et al. [Dobson 92]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	40° 50°	– Weihrauch-Kiefer und Seekiefer	0 – 560 t/ha	linear, 3	Biomasse (log)	P-L-C, HH, X, VV	P-X (0.98)	Sättigung ab ca. 100 t/ha	num.
3	Beaudoin et al. [Beaudoin 94]	NASA/JPL AIRSAR	P, L	40° 50°	– Seekiefer	10 – 140 t/ha	linear, 1	P-X, P-HH	Biomasse	P-X (0.81)	Uniforme Waldflächen (Pflanzung)	num.
4	Ranson et al. [Ranson 94]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	25° 35°, 50°	Fichte, Kiefer (Hemlock)	10 – 362 t/ha	linear, 1	P-X	Biomasse (log)	P-X (0.81)		num.
5	Rauste et al. [Rauste 94]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	35°, 55°	Fichte, Kiefer, Weisstanne	0 – 830 m ³ /ha (0 – 484 t/ha)	linear, 1	Biomasse	P-HV	P-X (0.75)	Negative Korrelation für L- und C-Band	grafisch
6	Israelsson et al. [Israelsson 94]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	40° 50°	– Esche, Pappel	10 – 315 m ³ /ha	linear, 1	Biomasse (log)	P-HH, P-VV, P-XX	Pappel: P-X (0.78) Esche: P-HH (0.95)		grafisch
7	Imhoff et al. [Imhoff 95b]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	20° 60°	– Trop. Regenwald.	50 – 300 t/ha	MIMICS	Struktur	P-quad	–	Einfluss der Struktur überwiegt Effekt der Biomasse	–
8	Rignot et al. [Rignot 95]	NASA/JPL AIRSAR	P	–	borealer Wald trop. Regenwald	4 – > 1000 t/ha	linear, 2	P-HH + P-VV + P-XX	Biomasse (log)	0.85 - 0.99	Einfluss von Überflutung auf Bodeninteraktion	num.
9	Ferrazzoli et al. [Ferrazzoli 97]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	35°, 55°	Wald und diverse landw. Fruchtstrecken	100 – 1300 t/ha	linear, 1	Biomasse	P-X, P-HH	P-X (0.93)	Testgebiet weist sehr niedrige oder sehr hohe Biomasse auf	grafisch
10	Hockman et al. [Hockman 00]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	25°, 60°	Trop. Regenwald	10 – 300	–	Biomasse	P-HV	P-X (0.94)	Schwergewicht auf Klassifikation	–
11	Saatchi et al. [Saatchi 00]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	20° 60°	– borealer Nadelwald	0 – 200 t/ha	nicht-linear	div. Parameter, P-L-C-quad	Biomasse	P-quad (0.89)	Frequenzkombinationen P-L-C-Band	–
12	Saatchi et al. [Saatchi 07]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	28° 63°	– Fichte, Kiefer, Tanne	0 – 200 t/ha	linear, nicht-linear	Biomasse (log)	P-HH, P-X, P-VV	P-X (0.89)	Auch Frequenzkombinationen P-L-C-Band	num.
13	Saatchi et al. [Saatchi 11b]	NASA/JPL AIRSAR	P, L, C	28° 63°	– Trop. Regenwald	0 – 300 t/ha	linear, 1	Biomasse	P-HH + P-X + P-VV	P-X (0.67)	Modell nur für Kombinationen wiedergegeben	–
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	DLR E-SAR	P, L	28° 50°	– borealer Nadelwald	0 – 300 t/ha	linear, 1	P-HH, P-X	Biomasse	P-HH (0.75)		num.
15	Neumann et al. [Neumann 12]	DLR E-SAR	P, L	28° 50°	– borealer Nadelwald	0 – 300 t/ha	nicht-linear	Rückstreuung, Kovarianzmatrix	Biomasse	P-quad (0.62)	Testgebiet Krycklan	–
16	Soja et al. [Soja 13]	DLR E-SAR	P, L	28° 50°	– borealer Nadelwald	0 – 300 t/ha	linear, 1-2	Rückstreuung	Biomasse	P-quad (0.78)	Testgebiet Krycklan	num.

TAB. 3.1: Übersicht über empirische Modelle zur Biomasseschätzung (Auswahl eingeschränkt auf P-Band).

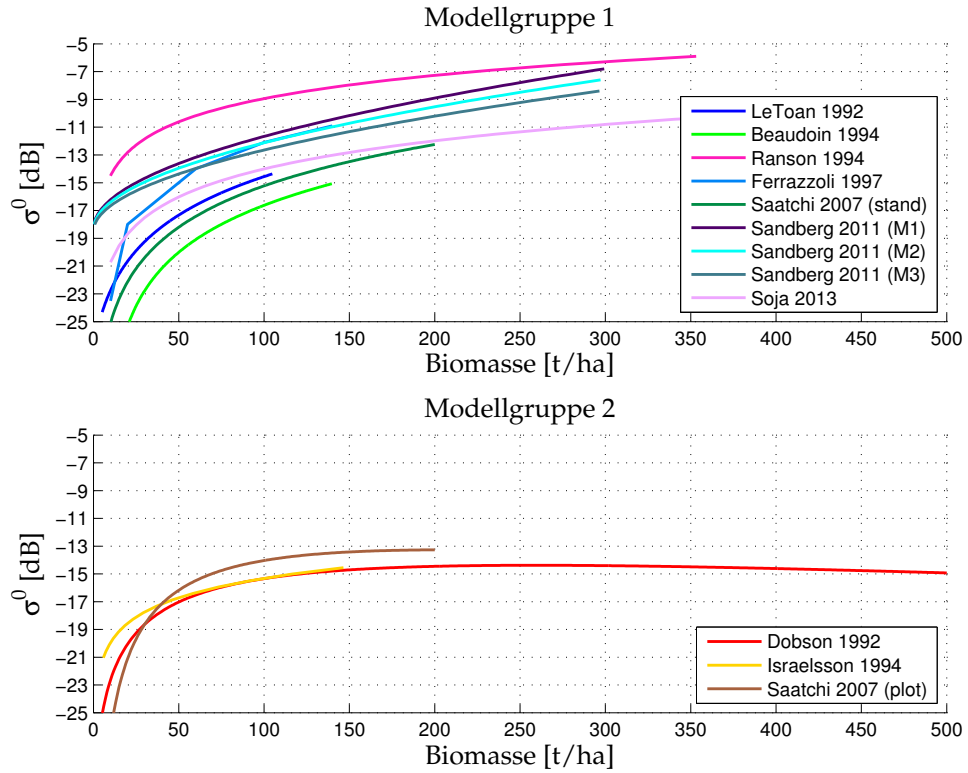


ABB. 3.1: Vergleich verschiedener empirischer Modelle (P-Band) zur Beziehung zwischen Biomasse und Rückstreuung im kreuzpolaren Kanal gemäss TAB. 3.1.

Schritt die Modelle in ihren Aussagen sehr ähnlich sind, die Modelle mit einer geringen Sättigung sind in der Überzahl. Aber auch eine starke Sättigungserscheinung mit Rückgang des Signals bei zunehmender Biomasse ist kein Einzelfall, sondern durch drei unabhängige Untersuchungen belegt.

In ABB. 3.3 wird ausserdem deutlich, dass der Zusammenhang zwischen Biomasse und Rückstreuung in natürlichen Einheiten (d.h. nicht-logarithmische Rückstreuung) mit Ausnahme der beiden Modelle nach Dobson et al. [Dobson 92] und das *plot*-basierte Modell nach Saatchi et al. [Saatchi 07] in guter Näherung linear ist.

Die in KAPITEL 2.5.2 vorgeschlagenen Modelle werden nun so parametrisiert, dass sie die vorgestellten Modelle nachbilden. Zur besseren Übersicht werden die drei Modelle (2.122) – (2.126) hier noch einmal aufgeführt:

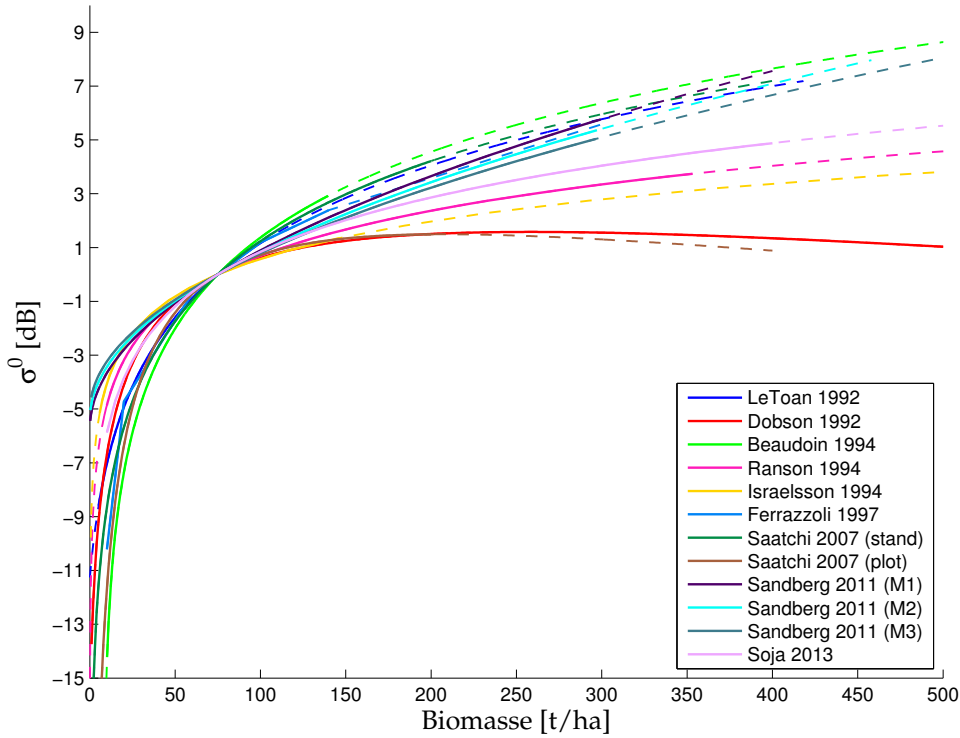


ABB. 3.2: Vergleich verschiedener empirischer Modelle zur Beziehung zwischen Biomasse und Rückstreuung im kreuzpolaren Kanal, P-Band, nach Wahl der Bezugsgrösse $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$ und Ableitung von σ_{ref} .

$$\text{Modell 1: } \sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^f$$

$$\text{Modell 2: } \sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^{(f+c_1 \cdot ((\delta B)-1))}$$

$$\text{Modell 3: } \sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^{(f \cdot (1+c_2) \cdot ((\delta B)-1))}$$

In der folgenden Tabelle TAB. 3.2 werden die Parametrisierungen gezeigt, die abhängig von der gewählten Bezugsgrösse $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$ zur besten Übereinstimmung führen.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass alle drei Modelle die Situationen mit geringer Sättigung gut wiedergeben können. Das zweite Modell ist dazu geeignet, auch Situationen mit hoher Sättigung zu beschreiben, was gemeinhin durch den zweiten Grad der Regressionsfunktion erreicht wird. Werden verschiedene Bezugsgrössen miteinander verglichen, wird deutlich, dass die Wahl der Bezugsgrösse B_{ref} die Übereinstimmung beeinflusst. Eine höherliegende Bezugsgrösse verbessert die Übereinstimmung. Allerdings ist schon bei einer Wahl von $B_{ref} = 75 \text{ t/ha}$ die Übereinstimmung zwischen dem zweiten Modell und den Literaturmodellen mit $R^2 = 0.969$ für

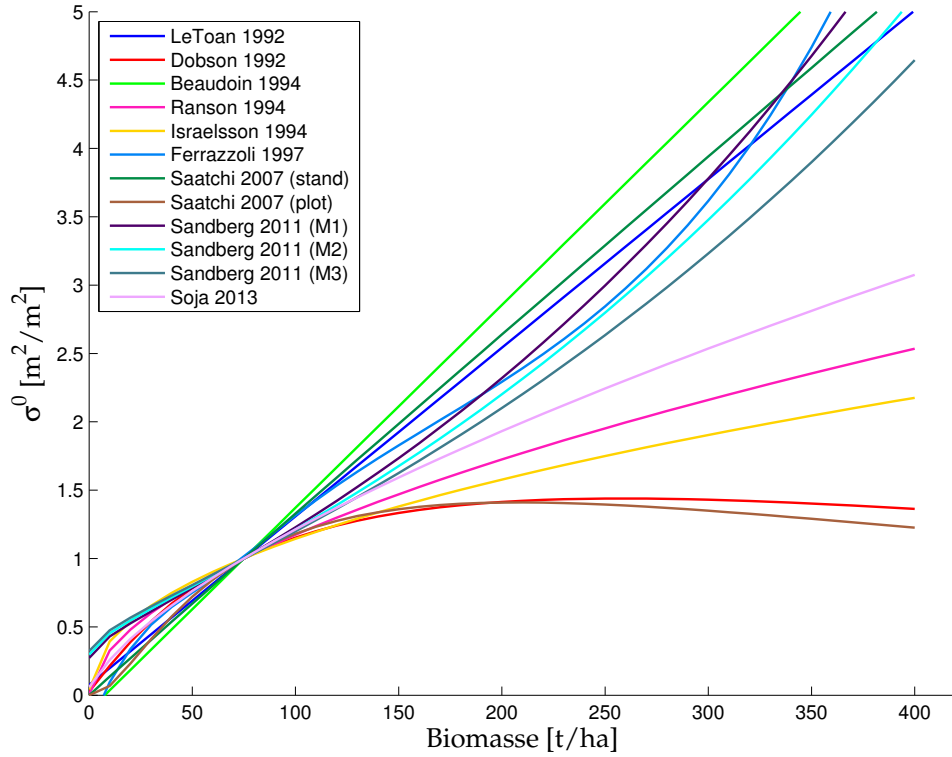


ABB. 3.3: Vergleich verschiedener empirischer Modelle zur Beziehung zwischen Biomasse und Rückstreuung im Kreuzpolaren Kanal, P-Band, nach Wahl der Bezugsgrösse $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$ und Ableitung von σ_{ref} in natürlichen Einheiten.

Nr.	Autoren	σ_{ref} [dB]	Modell 1		Modell 2			Modell 3		
			R^2	f	R^2	f	c_1	R^2	f	c_2
1	LeToan et al. [Le Toan 92]	-15.7	1.000	0.957	1.000	0.945	0.004	1.000	0.945	0.004
2	Dobson et al. [Dobson 92]	-16.0	0.199	0.266	0.993	0.465	-0.067	1.000	0.528	-0.213
3	Beaudoin et al. [Beaudoin 94]	-18.0	1.000	1.060	1.000	1.079	-0.006	1.000	1.079	-0.006
4	Ranson et al. [Ranson 94]	-9.6	1.000	0.556	1.000	0.556	-0.000	1.000	0.556	-0.000
6	Israelsson et al. [Israelsson 94]	-15.9	1.000	0.464	1.000	0.465	-0.000	1.000	0.465	-0.000
9	Ferrazzoli et al. [Ferrazzoli 97]	-13.3	0.921	0.953	0.996	0.642	0.102	0.998	0.679	0.116
12	Saatchi et al. [Saatchi 07] <i>stand</i>	-16.5	1.000	0.989	1.000	0.989	0.000	1.000	0.989	0.000
12	Saatchi et al. [Saatchi 07] <i>plot</i>	-14.8	-0.980	0.230	0.969	0.510	-0.094	0.997	0.652	-0.311
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-12.6	0.961	0.952	1.000	0.752	0.068	1.000	0.773	0.073
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-13.0	0.962	0.892	1.000	0.704	0.064	1.000	0.723	0.073
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-13.4	0.964	0.840	1.000	0.662	0.060	1.000	0.680	0.073
16	Soja et al. [Soja 13]	-14.8	1.000	0.671	1.000	0.671	0.000	1.000	0.671	0.000

TAB. 3.2: Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 75 \text{ t /ha}$.

die *plot*-basierte Untersuchung nach Saatchi [Saatchi 07] im schlechtesten Fall hoch. Die Wahl der Bezugsgrösse beeinflusst die grundsätzliche Modellaussage nicht. In ABB. 3.4 wird die gute

Übereinstimmung zwischen Modell 2 und den Modellen aus der Literatur illustriert. Die Aussage des dritten Modells ist grundsätzlich gleich wie die des zweiten Modells. In Situationen mit hoher Sättigung (als Beispiel die *plot*-basierte Schätzung nach Saatchi et al. in [Saatchi 07]) zeigt sich ein Unterschied. Das dritte Modell schätzt einen höheren Wert für f , der durch einen ebenfalls höheren Wert der Konstanten c_2 korrigiert wird. Das zweite Modell ist einfacher interpretierbar, da in Situationen hoher Sättigung ein tieferer Wert für f und c_1 geschätzt wird. In der Folge werden daher nur das erste und zweite Modell betrachtet.

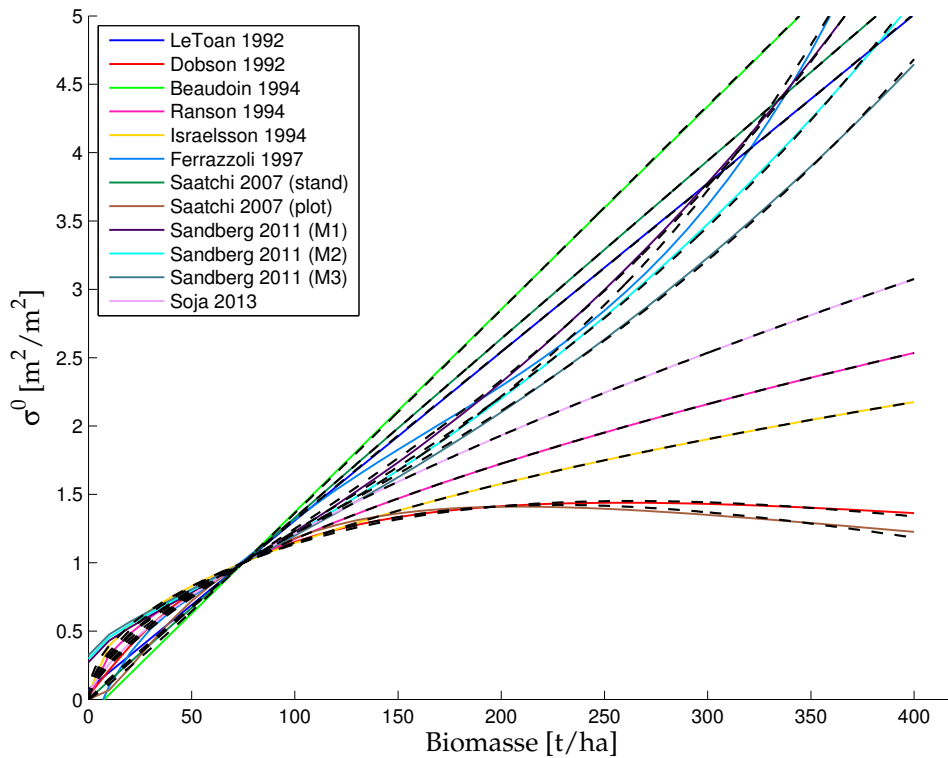


ABB. 3.4: Anpassung des zweiten Modells, $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$.

Die Parameter f und $c_{1,2}$ sind ebenfalls abhängig von der gewählten Bezugsgrösse. Die Abhängigkeit ist auch hier ausgeprägter in Situationen mit starker Sättigung. Im ANHANG D.1 finden sich gleichwertige Tabellen für $B_{ref} = 50 \text{ t ha}^{-1}$ und $B_{ref} = 125 \text{ t ha}^{-1}$, vgl. TAB. D.1 – TAB. D.3.

Der Parameter σ_{ref} unterscheidet sich zwischen den gezeigten Untersuchungen um bis zu 8.4 dB bei $B_{ref} = 75 \text{ t ha}^{-1}$. Diese Dynamik in der Rückstreuung liegt weit höher als das Signal durch unterschiedliche Biomasse.

Dies führt zu folgenden vorläufigen Erkenntnissen:

-
1. In den untersuchten Arbeiten beträgt der Unterschied der Rückstreuung für den kreuzpolaren Kanal (Volumenstreuung) im P-Band für eine geringe Biomasse (50 t ha^{-1}) und hoher Biomasse (450 t ha^{-1}) im besten Fall rund 7.5 dB, während der Unterschied des Achsenabschnittes der einzelnen Modelle bis zu 10 dB betragen kann. Der Unterschied zwischen verschiedenen Testgebieten in der absoluten Rückstreuung einer gegebenen Biomasse (Parameter σ_{ref} ist grösser als der Unterschied in der Rückstreuung zwischen tiefer und höchster untersuchter Biomasse). Der Parameter σ_{ref} weist einen Dynamikbereich auf, der das Signal unterschiedlicher Biomasse bei weitem übertrifft und dadurch die Vergleichbarkeit von Testgebieten erschwert.
 2. Das erste Modell versagt in Situation hoher Sättigungen, hat aber den Vorteil, leicht interpretierbar zu sein. Die beiden anderen Modelle erhöhen die Anpassungsgenauigkeit und erlauben eine Aussage über die Konstanz der Ausdünnung.
 3. Das zweite und dritte Modell erlauben eine Aussage über die Änderung des Parameters f mit zunehmender Biomasse. Die Parameter $c_{1,2}$ sind in Fällen mit deutlicher Sättigung erwartungsgemäss negativ, was bedeutet, dass die Ausdünnung mit zunehmender Biomasse zunimmt.
 4. Es ist mit diesem Ansatz möglich, alle der in der Literatur gefundenen und numerisch nachvollziehbaren Modelle zur Abhängigkeit der kreuzpolaren Rückstreuung im P-Band von der Biomasse zu beschreiben und zu vergleichen. Im Unterschied zur Literatur kann für alle Modelle die Rückstreuung als abhängige Variable behandelt werden. Mit dem zweiten und dritten Modell ist es möglich, alle Sättigungsverläufe mit hoher Übereinstimmung nachzubilden, es werden keine Regressionsfunktionen höheren Grades benötigt. Das erste Modell beschreibt Szenarien nur mit geringer bis mittlerer Sättigung mit hoher Übereinstimmung.
 5. Die hier deutlich werdenden Unterschiede zwischen den Untersuchungen widersprechen einer globalen Vergleichbarkeit von Testergebnissen, wie sie in [Le Toan 11] festgestellt wird.

3.2 Datengrundlage und Datenverarbeitung in den Testgebieten

Die Datengrundlage in den beiden Testgebieten und die Verarbeitungsschritte werden kurz erläutert.

Testgebiet Hinwil

Datengrundlage sind die mittels *extended- ω -k*-Verfahren durch die *Remote Sensing Laboratories (RSL)* fokussierten *single look complex (SLC)*-Daten. Im Verlauf der Prozessierung wurde ein 4-fach *multilooking* in Azimutrichtung vorgenommen, was zu einer Pixelgrösse von $slant\ range \times azimuth = 1.5\text{ m} \times 0.75\text{ m}$ führt. Um ein ausreichendes *despeckling* zu erreichen, wurde das Verfahren nach Lee angewandt mit Parameter $\sigma = 0.6$ [Lee 99b]. Rückstreuwerte werden geschätzt, indem die Stichprobenflächen des Forstinventars (vgl. ABB. 2.20) in die *slant range*-Geometrie des SLC projiziert werden. Die Lokalisierungsgenauigkeit dieses Verfahren wurde anhand von Reflektorpositionen überprüft, die verbleibende Lokalisierungsungenauigkeit liegt deutlich unter einem Pixel.

Als Ergänzung und zur Kontrolle der polarimetrischen und radiometrischen Kalibration wurden alle Berechnungen basierend auf den durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR prozessierten SLC-Daten mit weitgehend identischen Bildparametern wiederholt durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass bezüglich der Intensitätswerte zwischen den beiden Produktserien weitgehend übereinstimmende Werte resultieren. Phasenunterschiede im VV-Kanal, deren Ursprung nicht restlos geklärt werden konnte, wurden mit Hilfe der aufgestellten Reflektoren korrigiert. Der Unterschied zwischen DLR- und RSL-Prozessierung besteht darin, dass die DLR-Daten in die Geometrie des *master track* koregistriert worden sind, während die RSL-SLCs in individuellen *slant range*-Geometrie vorliegen. Die Pixelpositionen der Stichprobenpunkte wurden daher für jede Aufnahme neu berechnet, was einer Koregistrierung gleichkommt, aber keine Neuabtastung (*resampling*) der Rückstreuwerte benötigt. Als Referenzdatensatz gilt die Fluglinie 06swisar0109x1 (vgl. TAB. 2.4), die für die DLR-Koregistrierung die *master*-Geometrie darstellt.

Im Testgebiet stehen 42 Stichproben des Kantonalen Forstinventars zur Verfügung. Die Positionen sowie Nummerierung der Stichproben wird in ABB. 2.20 und D.4 gezeigt.

Testgebiet Krycklan

Die ausgedehnten Waldflächen wurden in Flächen mit angenommenen konstanten Strukturparametern unterteilt, sogenannte Waldbestände (*stands*). In jedem der 31 *stands* wurden, vergleichbar mit der Datenerhebung im Testgebiet Hinwil, auf kreisförmigen Stichprobenflächen Parameter geschätzt. Die Anzahl solcher Stichprobenflächen (*plots*) unterscheidet sich je nach *stand*. Wie schon im Testgebiet Hinwil basieren die folgenden Analysen auf diesen einzelnen Stichproben (*plots*). Die Stichproben wurden der Einfachheit halber neu nummeriert, der Zusammenhang zur Nummerierung gemäss [Hajnsek 09] kann mit TAB. D.5 hergestellt werden. Die Auflösung der flugzeuggestützten *SAR*-Daten ist mit ~ 1.5 m so gross, dass für eine solche Stichprobenfläche ein Set aus ~ 140 Auflösungszellen (entspricht in den verwendeten georektifizierten Daten ~ 250 Pixeln) zur Verfügung stehen. Da die Daten zusätzlich mit dem Verfahren nach Lee [Lee 99b] mit Parameter $\sigma = 0.6$ einem *despeckling* unterzogen wurden, ist diese Stichprobengrösse ausreichend für eine verlässliche Schätzung.

Für das Testgebiet Krycklan stehen georektifizierte SLC-Daten zur Verfügung. Die Pixelgrösse ist in Abweichung zum Testgebiet Hinwil quadratisch mit 1 m in *northing* und *easting*. Die Daten entstammen 7 Fluglinien mit unterschiedlichen Flugrichtungen. In ABB. 2.19(a) und ABB. 2.19(b) sind die Verläufe der einzelnen Fluglinie grafisch dargestellt. Nicht alle Stichprobenflächen werden durch alle *tracks* abgedeckt, so dass zwei Testgebiete t01 und t02 unterschieden werden.

Das Testgebiet Krycklan wurde durch die Arbeiten von Neumann et al. [Neumann 12] und Soja et al. [Soja 13] untersucht. Die hier gezeigten Resultate werden in Beziehung mit diesen Arbeiten gesetzt. Im *ESA final report* [Hajnsek 09] wurde die Biomasseinversion ebenfalls untersucht.

3.3 Radiometrische Normalisierung

Testgebiet Hinwil

Da die zeitliche Stabilität von Streumechanismen im P-Band als hoch angesehen werden kann und auch das Aufnahmesystem im betrachteten Zeitraum als stabil angenommen werden kann (alle Fluglinien wurden am selben Tag in wenigen Stunden aufgenommen), können diese unabhängigen Schätzungen als aus der selben Grundgesamtheit stammend angesehen werden. Da die Fluglinien für eine tomographische Auswertung geplant wurden, tritt relativ zur Referenz-Fluglinie 06swisar0101x1 eine vertikale und horizontale Basislinie auf, die bis zu 320 m beträgt. Dies äussert sich in einer Variation des lokalen Einfallswinkels θ_i für jede Stichprobenfläche um bis zu 10° .

Um die systematischen Effekte der Einfallswinkeländerung auf Grund der zwischen den Fluglinien variierenden Basislinien, aber auch Einflüsse der lokalen Topographie möglichst zu korrigieren, werden die Daten radiometrisch normalisiert. In Betracht gezogen werden die Normalisierungen β^0 , σ^0 und γ^0 . Die Normalisierungen sind in ANHANG D.5 definiert. Eine Übersicht über derartige Verfahren findet sich in [Small 11].

In ABB. 3.5 ist der lokale Einfallswinkel, berechnet aus einem digitalen Höhenmodell¹, für die einzelnen Stichprobenflächen dargestellt. Daraus wird erkennbar, dass die lokalen Einfallswinkel zwischen den einzelnen Fluglinien sich in ähnlichem Umfang unterscheiden wie innerhalb des Testgebietes. Auch wird deutlich, dass die lokalen Einfallswinkel für die Stichproben 8 und 9 sich stark vom Rest der Stichprobenflächen unterscheiden, was auf lokale Gegebenheiten zurückzuführen ist. Die Stichproben 8 und 9 liegen auf einer steil ansteigenden Böschung neben der Autobahn. Während dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass die Fokussierungsqualität der Fluglinie 06swisar0102x1 in den RSL-Daten sowie der Fluglinie 06swisar0107x1 in der DLR-Prozessierung stark abweicht. Die beiden Fluglinien werden daher aus den nachfolgenden Resultatberechnungen ausgeschlossen.

In ABB. 3.6 wird deutlich, dass die γ^0 -Normierung (Projektion der *slant range*-Fläche auf die Ebene senkrecht zur Beleuchtungsrichtung) die Einfallswinkelabhängigkeit weitgehend korrigiert. Es bleibt eine mittlere systematische Abweichung zwischen 0.02 dB bis 0.13 dB pro Winkelgrad bestehen, was angesichts der ohnehin beträchtlichen Streuung in den Stichproben vernachlässigbar ist.

¹Digitales Höhenmodell DHM25, <http://www.swisstopo.admin.ch>

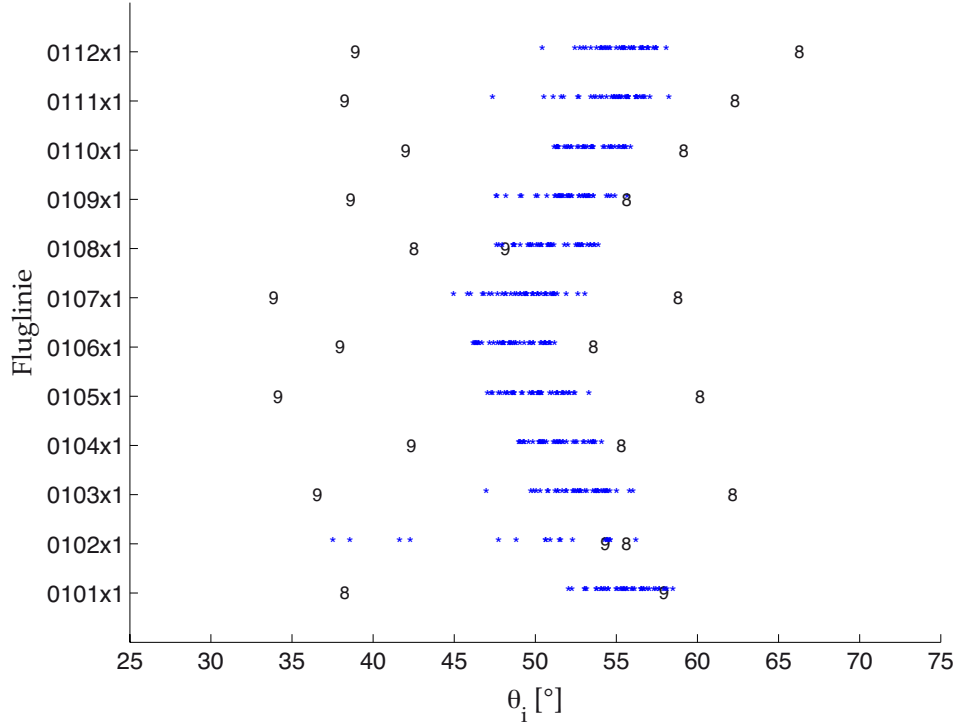


ABB. 3.5: Lokaler Einfallswinkel θ_i der Stichprobenflächen in den 12 Fluglinien, Testgebiet *Hinwil*. Die Stichproben 8 und 9 liegen deutlich ausserhalb des Einfallswinkelbereichs der restlichen Stichproben.

Für die Streumechanismen Oberflächenstreuung, Zweifachreflexion und Volumenstreuung führt die radiometrische Normalisierung zu folgenden verbleibenden Abweichungen in Abhängigkeit des lokalen Einfallswinkels, die als $\Delta\beta^0$, $\Delta\sigma^0$ und $\Delta\gamma^0$ gekennzeichnet werden und in TAB. 3.3 dargestellt sind.

	$\Delta\beta^0$ [dB]	$\Delta\sigma^0$ [dB]	$\Delta\gamma^0$ [dB]
Oberflächenstreuung	-0.171 ± 0.029	-0.111 ± 0.029	-0.023 ± 0.029
Zweifachreflexion	-0.130 ± 0.032	-0.069 ± 0.032	0.019 ± 0.032
Volumenstreuung	-0.189 ± 0.024	-0.130 ± 0.024	-0.041 ± 0.024

TAB. 3.3: Verbleibender Abweichungen in dB pro Winkelgrad unter Verwendung verschiedener radiometrischer Normalisierungen, Testgebiet *Hinwil*. (Datengrundlage: RSL-Prozessierung)

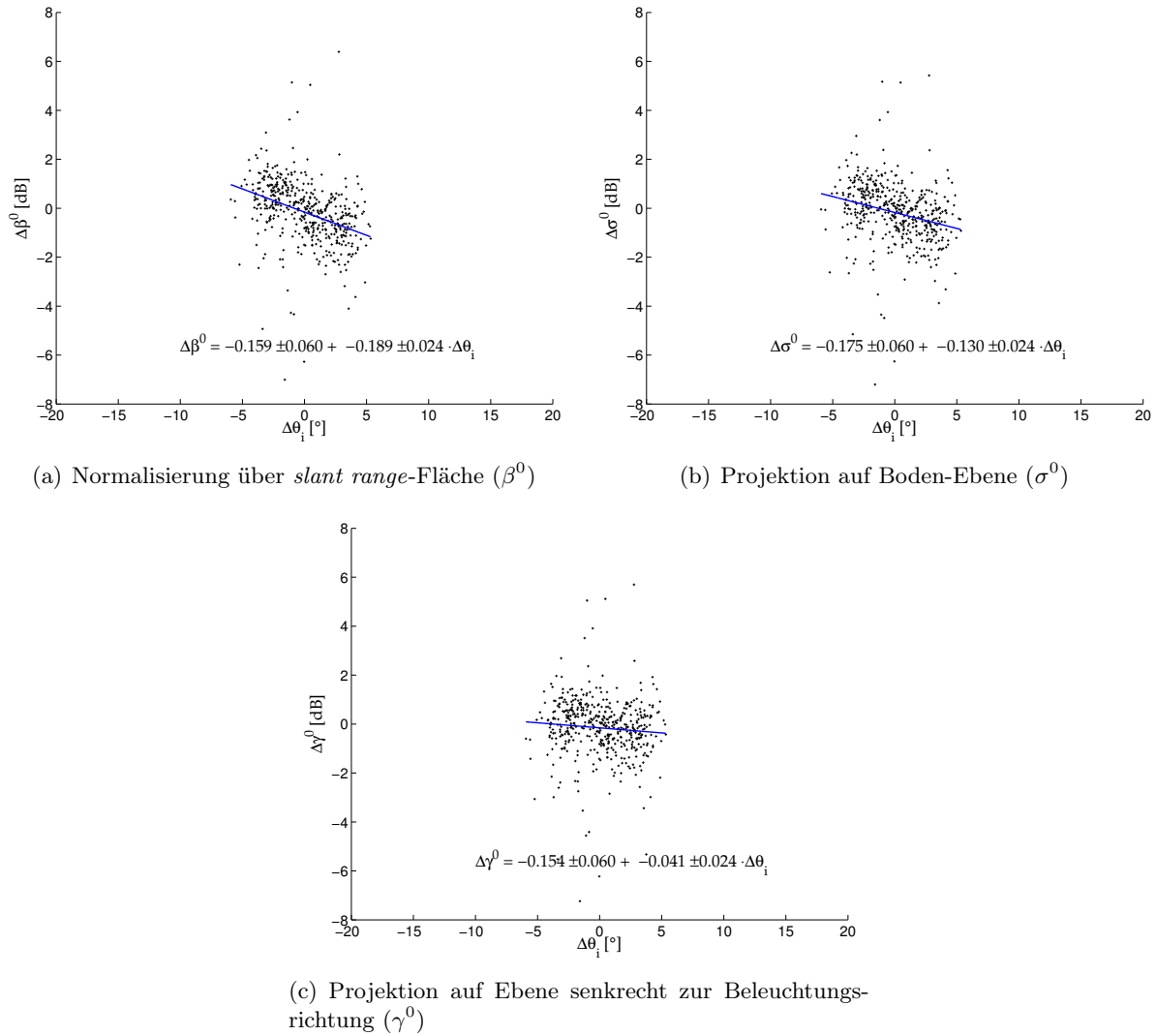


ABB. 3.6: Radiometrische Normalisierung und Einfallswinkel. Ein Punkt entspricht dem Mittelwert einer Stichprobenfläche, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert aus allen 12 Fluglinien, Testgebiet *Hinwil*. Datengrundlage ist die Prozessierung durch die *RSL*.

Testgebiet Krycklan

Im Testgebiet Krycklan ist für die Stichprobenkreise eine grössere Variation an Einfallswinkeln verfügbar. Die Einfallswinkel der Stichprobenflächen werden in ABB. 3.7 dargestellt.

In ABB. 3.8 zeigt sich, dass die γ^0 -Normalisierung wie im Testgebiet *Hinwil* auch hier die Einfallswinkelabhängigkeit zufriedenstellend korrigiert. Die Korrektur ist für die Volumenstreuung am effektivsten, es bleibt eine geschätzte Abweichung von maximal 0.024 dB pro Winkelgrad bestehen. Für die Oberflächenstreuung ist die verbleibende Abweichung vergleichbar, für die Zweifachreflexion verbleibt, wie schon im Testgebiet *Hinwil* festgestellt, eine grössere Abweichung

nach der γ^0 -Normalisierung. Die σ^0 -Normalisierung korrigiert die Einfallswinkelabhängigkeit der Zweifachreflexion besser. Es ist daher sinnvoll, die Zweifachreflexion in dieser Normalisierung zu betrachten.

Als Ergänzung werden in TAB. 3.4 die verbleibenden Abweichungen bezüglich der kopolaren Kanäle gezeigt (der kreuzpolare Kanal ist identisch mit der Volumenstreuung). Bemerkenswert ist, dass der HH-Kanal durch die σ^0 -Normierung besser korrigiert wird als durch die γ^0 -Normierung.

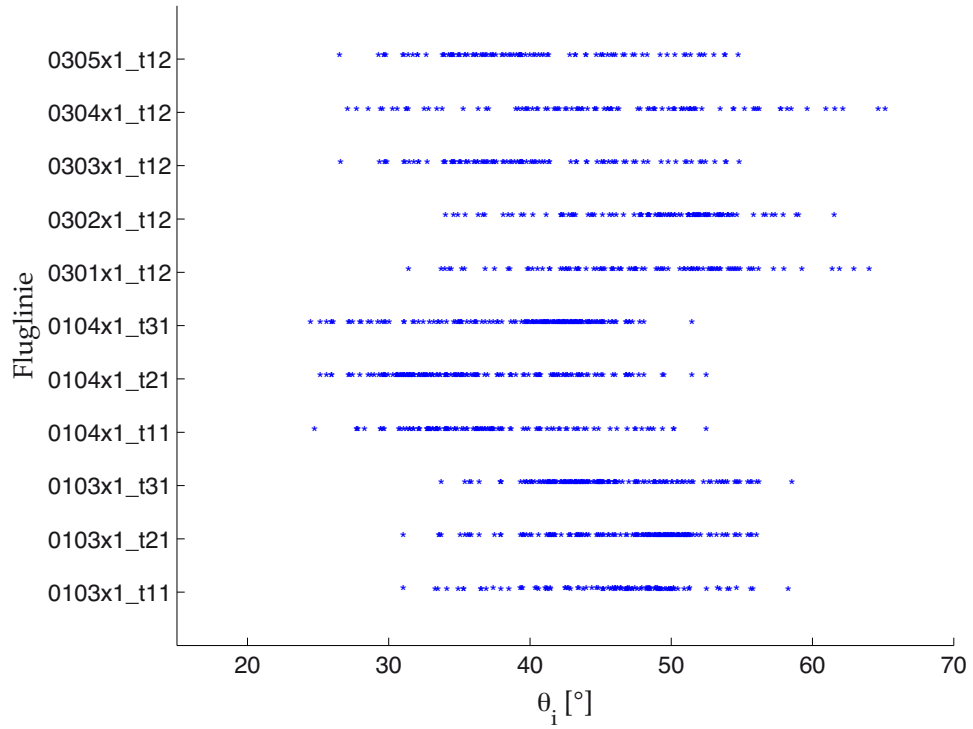


ABB. 3.7: Lokaler Einfallswinkel θ_i der Stichprobenflächen in den 11 Fluglinien, Testgebiet *Krycklan*.

	$\Delta\beta^0$ [dB]	$\Delta\sigma^0$ [dB]	$\Delta\gamma^0$ [dB]
HH	-0.086 ± 0.008	0.003 ± 0.007	0.067 ± 0.007
VV	-0.131 ± 0.008	-0.041 ± 0.007	0.022 ± 0.007

TAB. 3.4: Verbleibende Abweichungen in dB pro Winkelgrad unter Verwendung verschiedener radiometrischer Normalisierungen, kopolare Kanäle, Testgebiet *Krycklan*.

Die radiometrische Normierung ermöglicht es, die verschiedenen Fluglinien als unabhängige Schätzungen der selben Grundgesamtheit anzusehen. Dennoch können zwischen den Basislini-

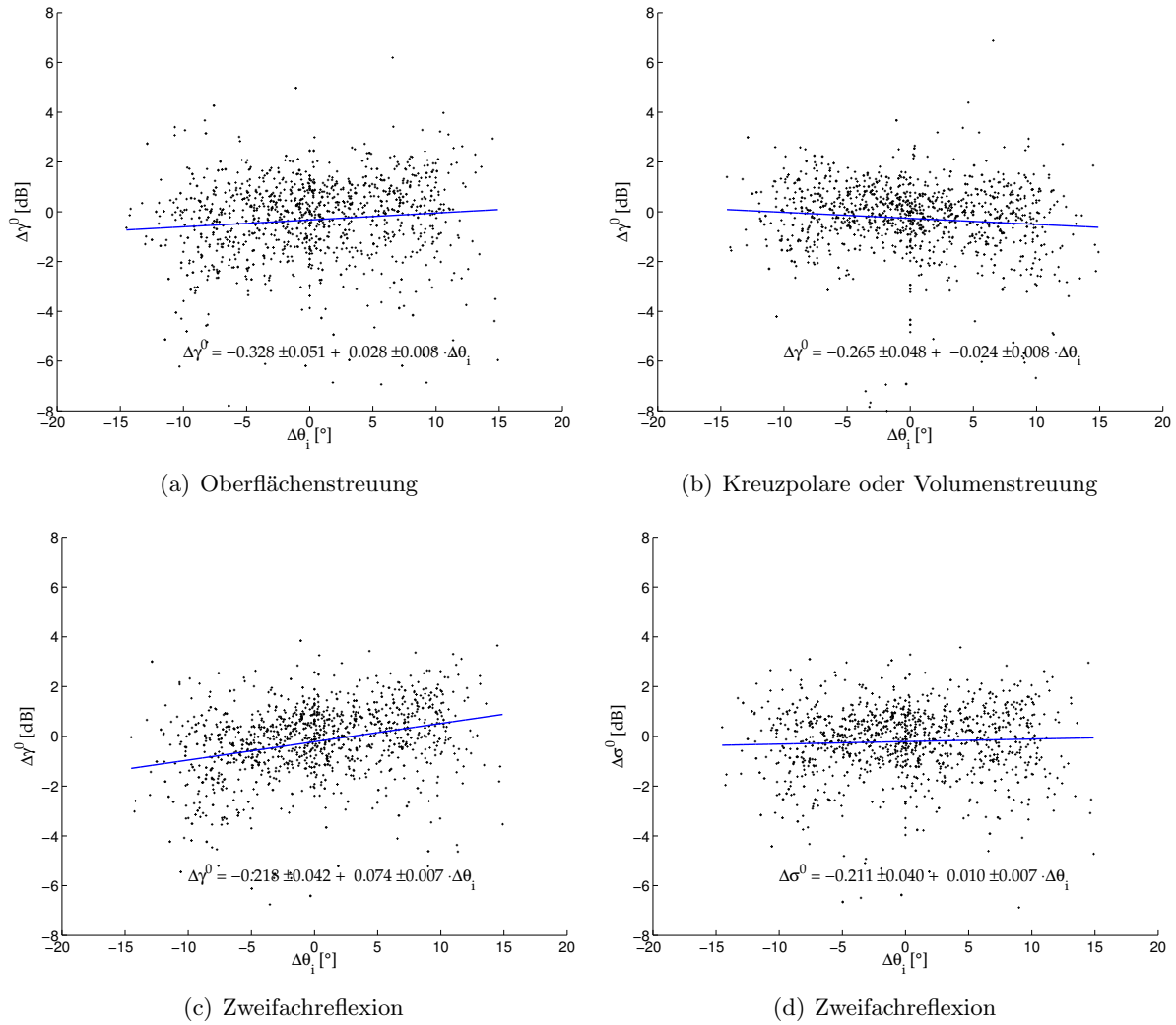


ABB. 3.8: Radiometrische Normalisierung und Einfallswinkel, Testgebiet *Krycklan*. Ein Punkt entspricht dem Mittelwert einer Stichprobenfläche, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert des lokalen Einfallswinkels $\Delta\theta_i$ und Abweichung vom Rückstreu-Mittelwert $\Delta\gamma^0$ aus allen Fluglinien. (a) Oberflächenstreuung, (b) kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung), (c) Zweifachreflexion γ^0 , (d) Zweifachreflexion σ^0 . Die Winkelabhängigkeit der Zweifachreflexion (HH-VV) wird abweichend durch die σ^0 -Normierung am besten korrigiert.

en systematische, einfallswinkelunabhängige Abweichungen auftreten. Gründe dafür können in unterschiedlichen Systemparametern liegen, z. B. kann die Fluggeschwindigkeit variieren, was zu veränderten Prozessierungsparametern führt. Die Verortung der Stichprobenflächen kann als Ursache für die Streuung ausgeschlossen werden, da diese anhand von Reflektorpositionen in allen Szenen überprüft wurde. Nicht ausgeschlossen werden kann aber, dass die Streumechanismen in Wäldern empfindlich auf kleinste Änderungen der Beleuchtungsgeometrie reagieren, was zu Abweichungen auch bei verschwindender Änderung des lokalen Einfallswinkels führt.

3.4 Abweichungen vom Modell

Es ist möglich, die R^2 -Werte eines Regressionsmodells zu verbessern, wenn die Zahl der Ausreisser reduziert werden kann. In der Folge werden Faktoren dargestellt, die zu einer von der durch ein Modell formulierten Erwartung abweichenden Rückstreuung führen.

3.4.1 Abweichungen durch ungeeignete Stichprobenflächen

Da aus den Stichproben ein Mittelwert geschätzt wird, ist ein Effekt, der zu abweichenden Rückstreuwerten führen kann, das Auftreten von inhomogenen Rückstreuwerteverteilungen innerhalb einer Stichprobe. Diese treten dann auf, wenn sich die Eigenschaften innerhalb der Stichprobe stark ändern. Das kann z. B. dann der Fall sein, wenn ein grosser Teil der Stichprobenfläche baumlos ist. In einem ersten Schritt werden deshalb die einzelnen Stichprobenflächen des Testgebietes Hinwil anhand ihrer Eignung für die Schätzung der *SAR*-Rückstreuung beurteilt. Da im Testgebiet Krycklan die einzelnen Baumpositionen nicht erhoben worden sind, kann eine gleichwertige Untersuchung nicht durchgeführt werden.

Als ungeeignet werden diejenigen Stichproben ausgeschieden, in denen die Baumpositionen ungleich verteilt sind, d.h. in denen Lücken zu erwarten sind. Als Alternative zum einfachen Ausschluss wurde versucht, eine konvexe Hülle um alle Baumpositionen zu legen und nur diese Fläche, projiziert in die *slant range*-Geometrie, zu berücksichtigen. In ABB. 3.9 sind die räumlichen Muster der Baumpositionen innerhalb der Stichprobenflächen mit den zugehörigen konvexen Hüllen ersichtlich. Die Teilflächen, die durch die konvexen Hüllen umschrieben werden, haben im Fall von lückenhaften Stichprobenkreisen typischerweise nur wenige Meter Ausdehnung. Die Lokalisierungsgenauigkeit der *SAR*-Daten und die Auflösung hat sich als unzureichend erwiesen, um solche Flächen zuverlässig im *SAR*-Bild zu identifizieren. Die Darstellung der kreuzpolaren Rückstreuwerte der Stichprobenflächen im Anhang in ABB. D.1 illustriert dieses Problem. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen kleinen Baumgruppen und Rückstreuwerteverteilung ist nicht herstellbar.

Die verbleibende Massnahme zur Reduktion von Ausreissern durch ungeeignete Stichproben ist also der Stichprobenausschluss. Die Stichprobenselektion wurde objektiviert, indem Stichprobenflächen nur dann zugelassen werden, wenn die konvexe Hülle um alle Baumpositionen innerhalb der Stichprobenfläche über 40% der Stichprobenfläche ausmacht. Der Wert 40% ist eine empirische Wahl. Es hat sich gezeigt, dass mit diesem Wert die Ausreisserzahl effektiv reduziert

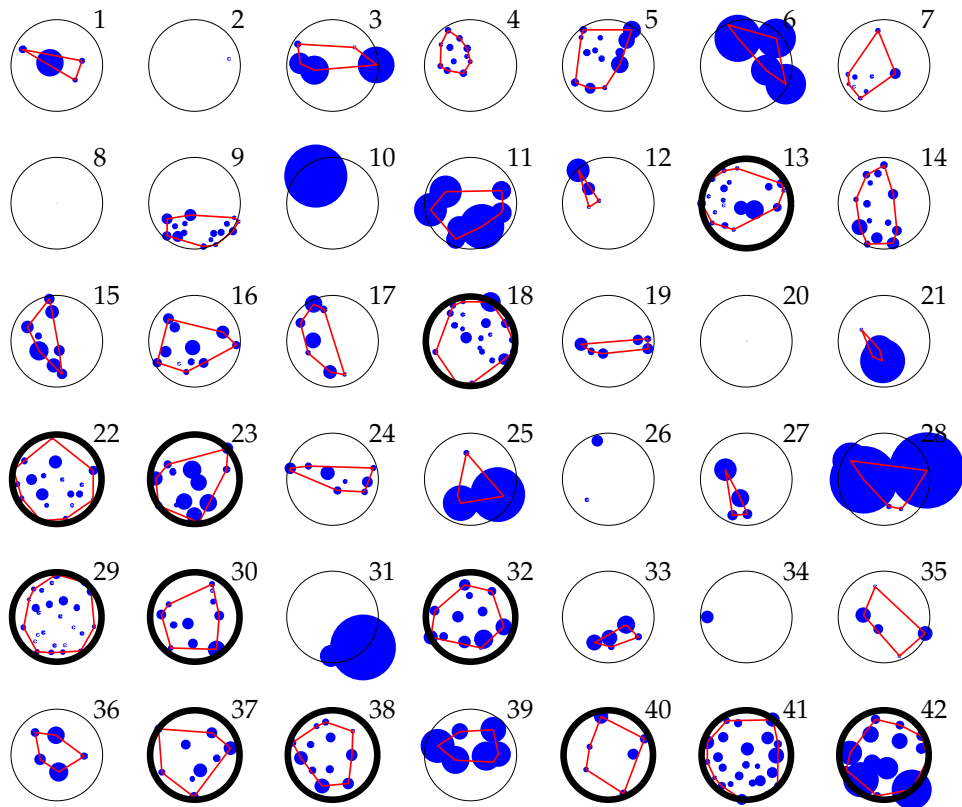


ABB. 3.9: Stichprobenflächen mit Baumpositionen und konvexe Hülle um alle Baumpositionen, Testgebiet *Hinwil*. Die Durchmesser der Baumsymbole stellen die Biomasse der Einzelbäume dar. Stichproben, in denen die konvexe Hülle um alle Baumpositionen mehr als 40% der Stichprobenfläche einnimmt, sind fett umrandet.

werden kann. Am Beispiel der Stichprobe Nr. 18 wird deutlich, dass dieses Verfahren für gewisse Konfigurationen eine Stichprobe auch dann zulässt, wenn die Mehrheit der Einzelbäume auf einer Fläche $< 40\%$ konzentriert sind, die konvexe Hülle aber durch vereinzelte Bäume über eine grössere Fläche aufgespannt wird. Die Stichprobe Nr. 18 wird daher ebenfalls zu den Stichproben mit einem zu geringen Bedeckungsgrad gezählt.

3.4.2 Abweichungen durch Lage der Stichproben

Da die Forstinventurdaten des Testgebietes Krycklan keine Schätzung des Bedeckungsgrades ermöglichen, wurden alle Stichproben zur Weiterverarbeitung zugelassen. Lediglich vereinzelte Stichproben mit sehr hoher Biomasse ohne Anschluss an die restlichen Stichproben wurden ausgeschlossen, sie sind als graue Symbole in den Grafiken zu erkennen.

In einem ersten Schritt werden die fünf sternförmig angeordneten Fluglinien 0301x1 bis 0105x1 des als Testgebiet t02 bezeichneten Gebietes untersucht. Zugelassen wurden die Stichproben aller *stands*, die vollständig durch alle Fluglinien abgedeckt werden. So verblieben 64 Stichproben (*plots*) im Gebiet. Die Flugrichtung nach Südosten, 133° , wurde zweimal geflogen. Die zweite 133° -Fluglinien 0305x1 wurde als Referenz angenommen und die Abweichungen der andern Fluglinien zu dieser Fluglinie berechnet. Um eine eventuelle Abhängigkeit von der Topographie festzustellen, wurde die Abweichung der gemessenen Rückstreuung mit der Änderung des lokalen Einfallswinkels zwischen den verschiedenen Fluglinien in Beziehung gesetzt.

Die kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung) ist in ABB. 3.10 gezeigt. Aus der Grafik wird deutlich, dass die Änderung der Rückstreuung nicht von der Änderung des Einfallswinkels abhängig ist. Die Abweichungen treten für alle Winkeländerungswerte auf, die Streuung der Schätzwerte nimmt aber für grössere Einfallswinkelabweichungen zu. Zusätzlich wird sichtbar, dass auch die übereinstimmende Flugrichtung zwar keine Differenzen bezüglich Winkeländerung zeigt, aber eine Streuung der Rückstreuungswerte von ± 1 dB. Das bedeutet, dass als Grundrauschen einer wiederholten Messung dieser Wertebereich angenommen werden muss. Von den 64 Stichproben zeigen 11 eine Abweichung grösser als 2 dB. Diese Ausreisser zu erklären ist der nächstfolgende Schritt.

In ABB. 3.11 sind die Stichproben mit einer Abweichung von mehr als 2 dB von den Referenzdaten einer farbkodierten Darstellung überlagert (weiss dargestellt). Mit Ausnahme der drei Stichproben im Nordosten der Szene liegen alle Stichproben nahe bei Waldrändern, Forstwegen, Flusstälern oder Erosionsrinnen. Steile Topographie ist eine mögliche Erklärung für die abweichende Rückstreuung bei einer Änderung der Beleuchtungsrichtung. Für Stichproben, die nahe bei einer freien Fläche liegen, findet die Bodeninteraktion je nach Beleuchtungsrichtung auf der freien Fläche statt oder im Wald. Zusätzlich ist damit zu rechnen, dass in der Probefläche durch das *foreshortening* in jedem Fall auch unmittelbar benachbarte Bäume erfasst werden können. Wenn nun die Beleuchtung zur freien Fläche hin erfolgt, gibt es keine Objekte, die durch das *foreshortening* in die Stichprobenfläche abgebildet werden. Die Gesamtückstreuung kann also deutlich kleiner ausfallen. Für die Stichproben, die nahe bei einem Geländeeinschnitt liegen, unterscheidet sich die Stärke der nach einer Reflexion am Boden einfallende Strahlung. Ist der Abhang des benachbarten Einschnittes zum Sensor hin geneigt, ist es unwahrscheinlich, dass das Signal nach der Bodeninteraktion die Stichprobenbäume erfasst (dafür würde sich die direkte Reflexion der Fläche erhöhen). Aus der entgegengesetzten Beleuchtungsrichtung ist kein Einfluss des Geländeeinschnittes auf die Rückstreuung anzunehmen.

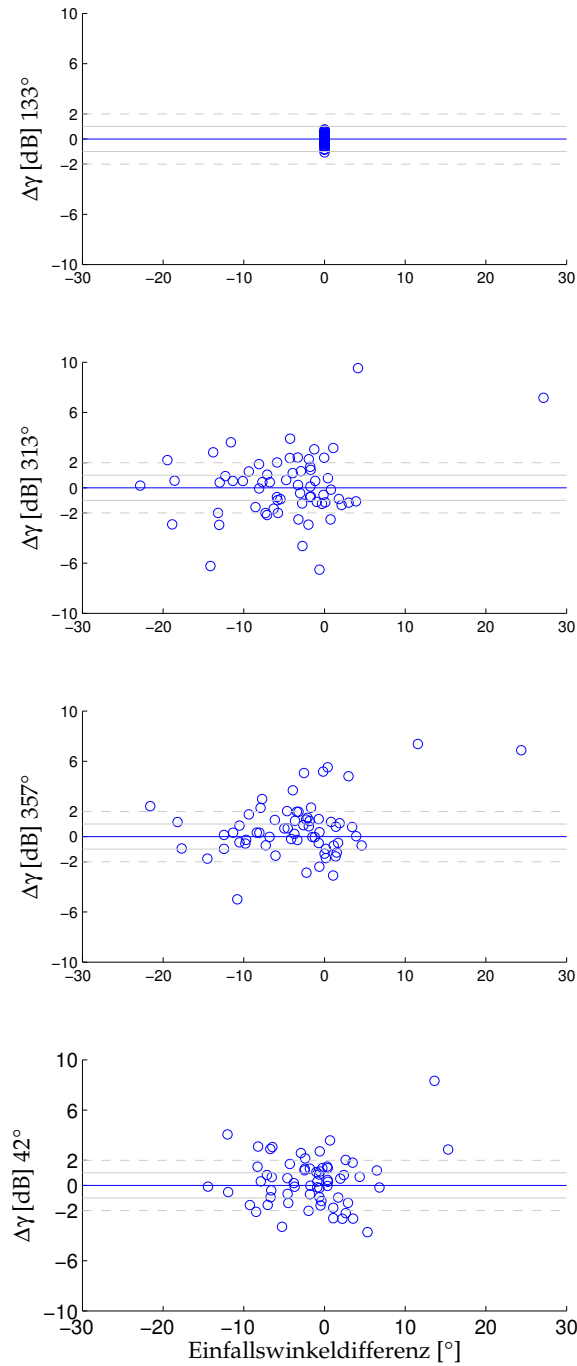


ABB. 3.10: Abweichung der Stichprobenmittelwerte zwischen den unterschiedlichen Fluglinien anhand der Einfallswinkeldifferenz, Volumenstreuung, Testgebiet t02, *Krycklan*.

Die Stichproben in den beiden gegenläufig orientierten Fluglinien 0103x1 (313°) und 0104x1 (133°) zeigen eine grössere Streuung als in den fünf oben untersuchten Fluglinien des Testgebietes t02, wie in ABB. 3.12 deutlich wird. In dieser Darstellung wurde zusätzlich zwischen der Änderung der Neigung in Flugrichtung (Azimut-Neigung) und senkrecht zur Flugrichtung (*range*-Neigung)

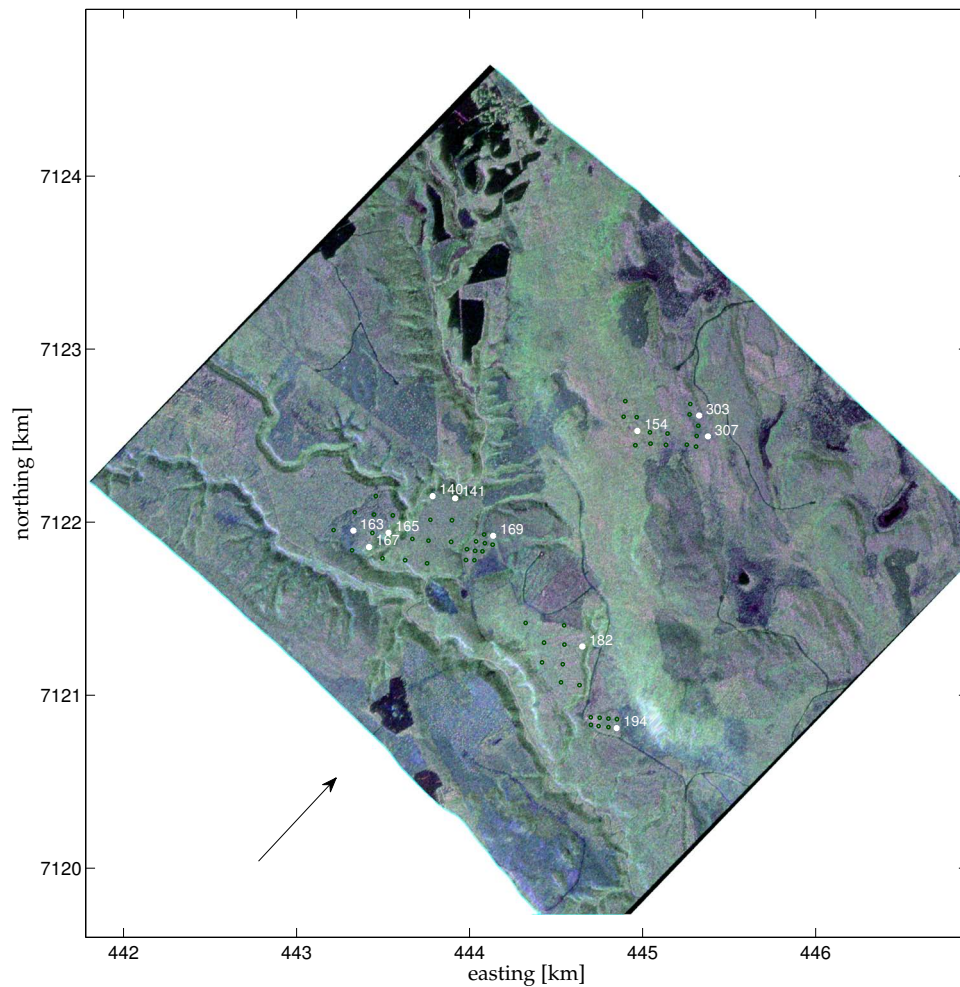


ABB. 3.11: Stichproben im Testgebiet t02 *Krycklan* mit mehr als 2 dB Abweichung vom Referenztrack in mindestens einer Fluglinie (weisse Beschriftungen und Symbole). Die restlichen Stichproben sind als dunkelgrüne Punkte markiert. Die Kilometerkoordinaten beziehen sich auf UTM Zone 34, die Farbkodierung basiert auf den Streumechanismen. Blau: Oberflächenstreuung, grün: Volumenstreuung, rot: Zweifachreflexion.

unterschieden, in Ergänzung zur Änderung des lokalen Einfallswinkels. Auch hier ist für die Volumenstreuung keine Abhängigkeit von einer Winkeländerung zu erkennen, allerdings ist die Streuung deutlich grösser als in den fünf Fluglinien des Testgebietes t02.

Werden die Stichproben, die um mehr als 4 dB streuen, in der farbkodierten Darstellung der Szene in 3.13 betrachtet, so wird deutlich, dass auch hier einige der stark streuenden Stichproben in der Nähe von den schon oben diskutierten Geländeeinschnitten liegen. Andere Stichproben hingegen, die auch nahe bei solchen Einschnitten liegen, streuen nicht so stark. Für einige der stark streuenden Stichproben ist keine topographische Änderung sichtbar. Die Erklärung der Stichprobenstreuung durch Geländeeinflüsse alleine ist demnach nicht haltbar. Dennoch kön-

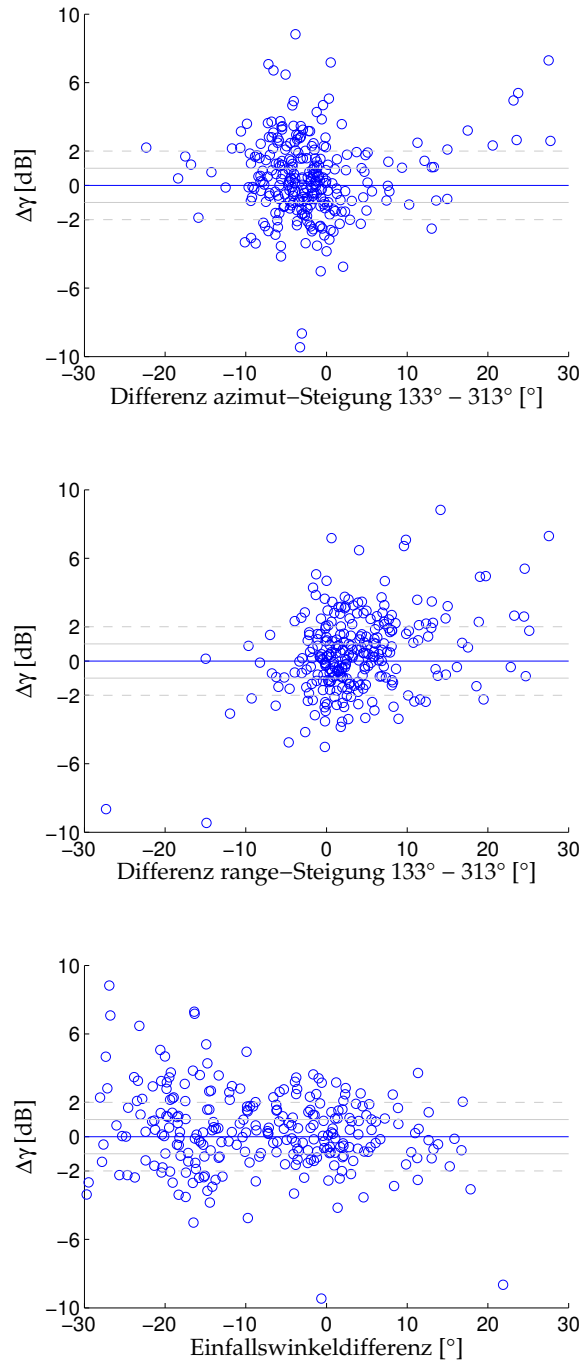


ABB. 3.12: Abweichung der Stichprobenmittelwerte zwischen den unterschiedlichen Fluglinien anhand der Einfallswinkeldifferenz, Volumenstreuung, Testgebiet t01, *Krycklan*.

nen Stichproben, die nahe bei diskontinuierlich verlaufenden Umweltparametern (Waldränder, Bestandesgrenzen, Einschnitte), zu einer starken Streuung führen.

In Krycklan zeigt sich in den kopolaren Mechanismen kein Einfluss der Einfallswinkeländerung. Im Testgebiet t01 mit der grösseren Einfallswinkeländerung ist in ABB. 3.14 für die

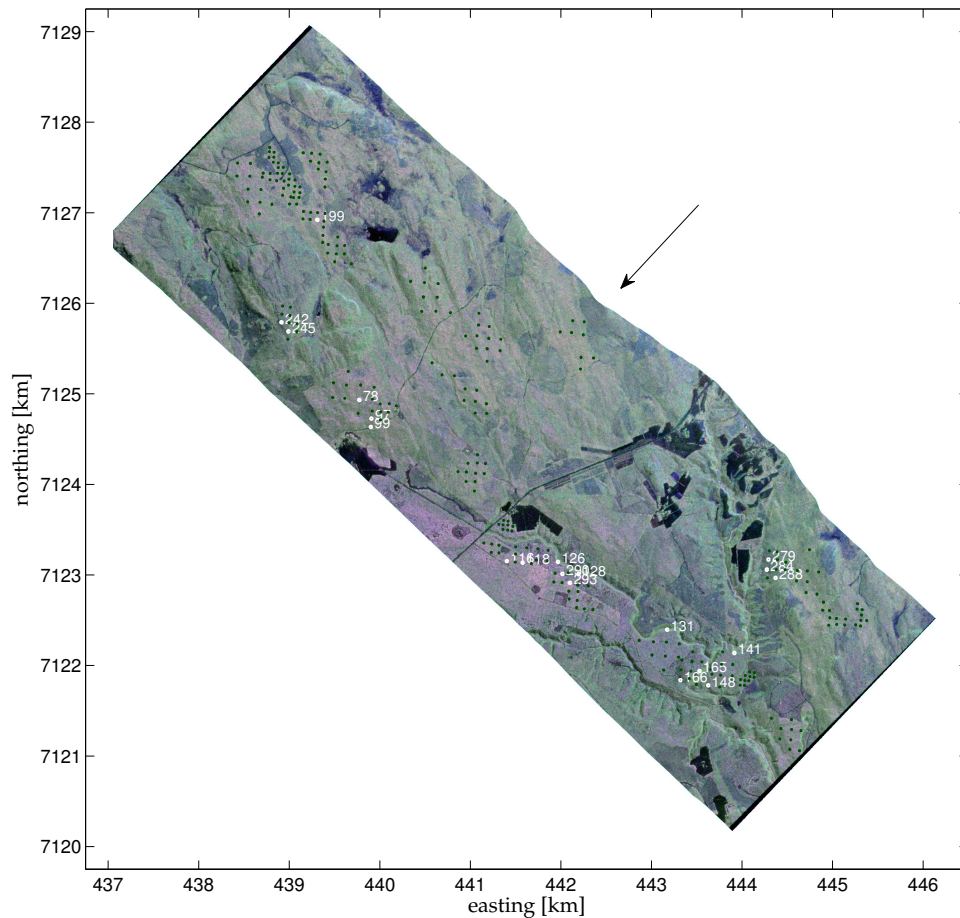


ABB. 3.13: Stichproben im Testgebiet t01 *Krycklan* mit mehr als 4 dB Abweichung zwischen der Fluglinie 0103x1 (313°) und Fluglinie 0104x1 (133°) (weisse Beschriftungen und Symbole). Die restlichen Stichproben sind als dunkelgrüne Punkte markiert. Die Kilometerkoordinaten beziehen sich auf UTM Zone 34, die Farbkodierung basiert auf den Streumechanismen. Blau: Oberflächenstreuung, grün: Volumenstreuung, rot: Zweifachreflexion.

Zweifachreflexion in der σ^0 -Normalisierung ebenfalls kein Einfluss des Einfallswinkels sichtbar, für die Oberflächenstreuung verbleibt eine Abhängigkeit, die mit der nicht perfekten radiometrischen Normalisierung (sichtbar in ABB. 3.8(a)) erklärt werden kann.

3.4.3 Abweichungen durch Mie-Oszillationen

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Änderung des lokalen Einfallswinkels und die Positionierung der Stichproben zwar eine Streuung der Stichproben verursachen können, aber als alleinige Erklärungsparameter dazu nicht ausreichend belegt sind, bleibt Erklärungsbedarf. Wenn Positionierungsfehler zwischen den untersuchten Fluglinien ausgeschlossen werden (die Positionierungsgenauigkeit wurde anhand der Reflektoren überprüft, es konnte eine Ungenauigkeit

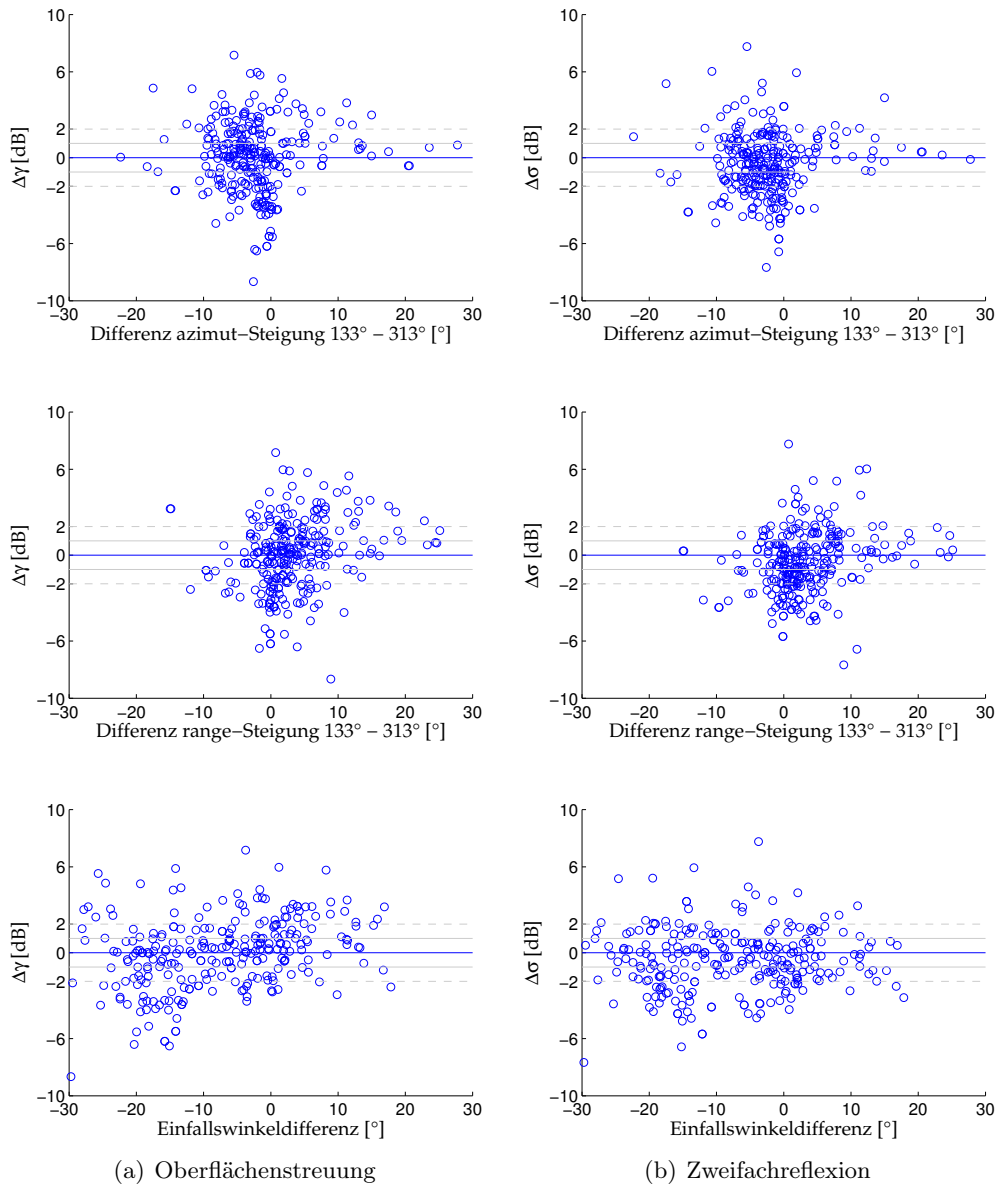


ABB. 3.14: Kopolare Mechanismen in Abhängigkeit der Einfallswinkeländerung, Testgebiet *Krycklan*

von < 1 m festgestellt werden), bleibt festzuhalten, dass die veränderte Beleuchtungsrichtung für die Stichprobenstreuung verantwortlich sein muss. Ein möglicher Mechanismus, der dazu passt, ist die Eigenschaft eines Streuers, dessen Dimension in der sogenannten Mie-Region liegt. Im allgemeinen Streutheorem nach Mie, das in Kapitel 2.5.2 in ABB. 2.24 dargestellt wird, ist diese Region die, in der die Rückstreuung sich bei einer kleinen Änderung der Streuerdimension stark ändert, sie oszilliert. Wenn nun die Rückstreuung eines Baumes modellhaft als kohärente Summe vieler Einzelstreuer in diesen kritischen Dimensionen betrachtet wird, wäre erklärbar,

weshalb eine Änderung der Beleuchtungsrichtung eine starke Änderung der Rückstreuung mit sich bringt. Die veränderte Orientierung der Einzelstreuer entspricht im Allgemeinen einer Änderung der Streuerdimension, da nur die Dimension des Streuers quer zur Blickrichtung des Sensors massgeblich zur Rückstreuung beiträgt. Das Konzept der Mie-Oszillationen im Zusammenhang mit der gemessenen *SAR*-Rückstreuung wird durch Brolly und Woodhouse in [Brolly 12a] als theoretische Überlegung eingeführt.

Beobachtungen mit Simulationen

Das entwickelte Streumodell kommt nun zum Einsatz, um die Vermutung, dass die Einzelbäume in Krycklan in dieser kritischen Mie-Region liegen, zu überprüfen. Die Simulation der Einzelbaumrückstreuung wird auch für die nachfolgenden Kapitel als Grundlage verwendet, sie wird daher hier nicht ausführlich diskutiert, sondern als Vorgriff wird in ABB. 3.15 die simulierte Volumenstreuung eines Einzelbaumes gezeigt.

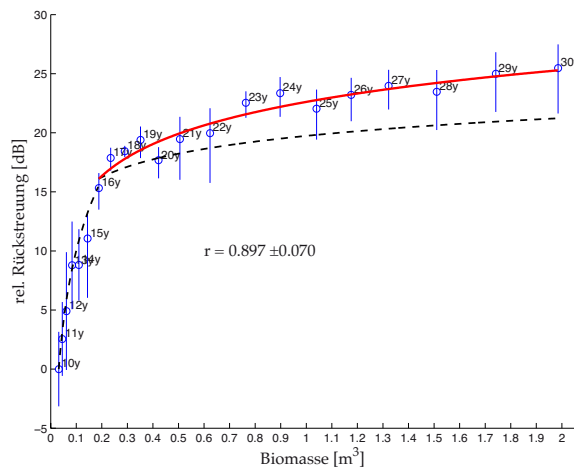


ABB. 3.15: Simulierte Volumenstreuung eines Einzelbaumes mit einem virtuellen Alter von 10 bis 30 Wachstumszyklen. Alle Werte relativ zur Biomasse und Rückstreuung des 10-jährigen Modellbaums. Die gestrichelten Graphen stehen für die Exponenten $r = 2$ und 0.5 , was der Rayleigh-Streuung bzw. der optischen Streuung entspricht. Der rote ausgezogene Graph entspricht der optimalen Anpassung. Die Streuung einer Altersstufe ergibt sich daraus, dass das Baummodell in 10° -Schritten rotiert wurde.

In dieser Grafik liegt die vermutete Mie-Region in der Übergangszone zwischen Rayleigh-Streuung und optischer Streuung, die in der Simulation nicht gänzlich erreicht wird. Für die simulierten Baumalter bedeutet das, dass ab dem 16-jährigen Baummodell mit einer Biomasse von $\sim 0.15 \text{ m}^3$ die Mie-Region beginnt. Die Oszillationen sind durch die Abweichungen von der Kurve der besten Anpassung sichtbar. Sie nehmen ab einer Biomasse von $\sim 1 \text{ m}^3$ deutlich ab.

Beobachtungen Testgebiet Krycklan

Wenn diese Mie-Oszillationen zur Streuung zwischen Stichproben beitragen, müssten Stichproben mit kleinen Einzelbaumbiomassen eine höhere Streuung zeigen als solche mit einer höheren Einzelbaumbiomasse. Allerdings könnten Stichproben mit tiefer Biomasse auch einen starken Anteil an kreuzpolarer Streuung mit Bodeninteraktion aufweisen, was die Streuung der Stichproben mit tiefer Biomasse erhöht. Dieser grundsätzliche Mechanismus wird in [Pulliainen 96] gezeigt, allerdings für multitemporale Daten mit ändernder Bodenfeuchte. In einem Testgebiet mit unterschiedlichen Bodenfeuchten ist aber die selbe erhöhte Varianz für Stichproben mit geringer Baumbedeckung zu erwarten. Um den Einfluss der Bodenfeuchte auszuschliessen, wird in ABB. 3.16 nicht die Varianz zwischen allen Stichproben gezeigt, sondern die Varianz der Abweichungen von Stichproben zu einem Referenzdatensatz. Die Stichprobenabweichung Δ_{STP} wird wie folgt berechnet:

$$\Delta_{\text{STP}}[\text{dB}] = \gamma^0[\text{dB}] - \gamma_{\text{Referenz}}^0[\text{dB}] \quad (3.1)$$

Für die Stichproben des Testgebietes t01 bildet die Fluglinie 0103x1 (Flugrichtung 313° , vgl. TAB. 2.5) die Referenz. Für die fünf Fluglinien des Testgebietes t02 wurde die zweite Fluglinie in Richtung 133° , die Fluglinie 0305x1 (vgl. TAB. 2.6), als Referenz gewählt. So kann sichergestellt werden, dass nur die Änderungen einer bestimmten Stichprobe mit zwischen den Überflügen sicherlich identischen Bodenfeuchtebedingungen berücksichtigt werden. Nachdem die Stichproben anhand ihrer Biomassen klassiert worden sind, wurde die Varianz der Stichprobenänderungen in einer Klasse ermittelt. Um den Einfluss der Klassierung zu kontrollieren, wurde die Varianz anhand von Klassen mit festgelegter Breite von $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ geschätzt (blaue Kurve) und zusätzlich in Klassen mit identischer Mächtigkeit von 100 Stichproben-Änderungen (grüne Symbole).

Diese Grafik zeigt, dass die Abweichungen erst in einem Bereich um $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ herum ein Maximum zeigen. Die Bodenfeuchte als Einflussfaktor kann also ausgeschlossen werden, da die Varianz durch abweichende Bodenfeuchte für Stichproben mit geringer Biomasse grösser sein müsste. Noch detaillierter zeigt ABB. 3.17 die Abnahme der Streuung mit der mittleren Einzelbaumbiomasse. Die Schätzung mittels identischer Klassenbreite und identischer Klassenmächtigkeit zeigt eine hohe Übereinstimmung.

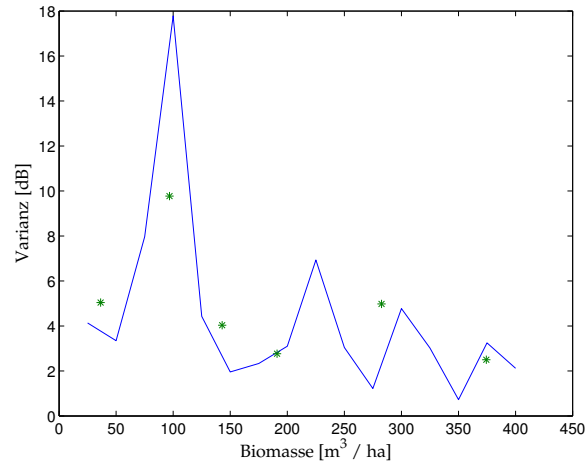


ABB. 3.16: Stichproben-Instabilität anhand der Gesamtbiomasse, Volumenstreuung, Testgebiet t01 und t02, *Krycklan*.

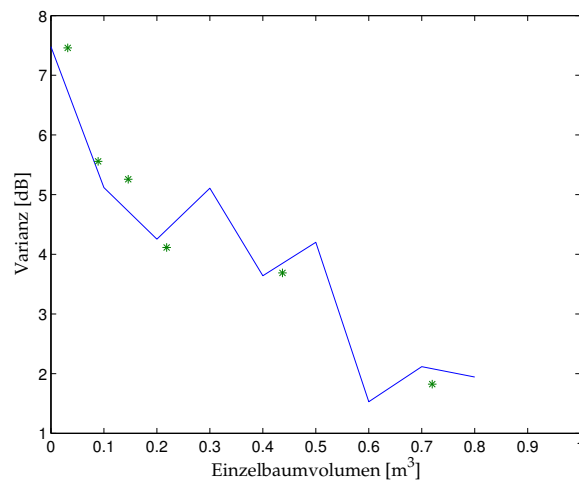


ABB. 3.17: Stichproben-Instabilität gemessen an der Varianz der Stichproben-Änderung anhand der Einzelbaumbiomasse, Volumenstreuung, Testgebiet t01 und t02, *Krycklan*.

Hier zeigt sich das erwartete Muster, wenn die Mie-Oszillation als Erklärung für die Streuung akzeptiert wird. Die Streuung wird deutlich geringer ab einer Einzelbaumbiomasse $\sim 0.6 \text{ m}^3$, was gut mit der Simulation übereinstimmt. Die Rayleigh-Region für sehr tiefe Einzelbaumbiomassen unter 0.15 m^3 ist nicht erkennbar, was damit zusammenhängen kann, dass zur mittleren Einzelbaumbiomasse auch grössere Bäume mit stärkeren Oszillationen beitragen.

Die Schlussfolgerung aus den beiden Grafiken ist, dass die Mie-Oszillation für die Streuung der Stichproben mit tiefer Einzelbaumbiomasse im kreuzpolaren Kanal einen erklärenden Mechanismus darstellt. Für die Datenverarbeitung bedeutet dies, dass die Mittelung verschiedener

Beleuchtungsgeometrien für eine verlässliche Schätzung von Stichproben mit tiefer Einzelbaumbiomasse und daraus abgeleitet meist auch tiefer Gesamtbiomasse vorteilhaft ist. Stichproben mit höherer Einzelbaumbiomasse wie im Testgebiet Hinwil sind von den Oszillationen nicht so stark betroffen, eine Mittelung ist nicht zwingend notwendig, wie die Analyse des Testgebietes Hinwil auch gezeigt hat. Dennoch verbessert auch dort die Mittelung die Schätzung, mit der Einschränkung, dass nicht-koregistrierte Daten gemittelt werden. Die Mittelung dämpft auch die in ABB. 3.12 sichtbare Streuung auf Grund von Einfallswinkeldifferenzen ein.

Die Untersuchung der Mie-Oszillationen für die kopolaren Mechanismen in ABB. D.2 zeigt, dass die Mie-Oszillationen für die kopolaren Mechanismen im Gegensatz zur Volumenstreuung nicht sichtbar sind. Eine detailliertere Beschreibung findet sich im ANHANG D.7.

3.5 Rückstreuung und Biomasse

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 2.5.2 entwickelten Modelle anhand von Daten der Testgebiete Hinwil und Krycklan parametrisiert. Es wird gezeigt, dass biophysikalische Parameter einen Teil der Streuung gegenüber dem Modell erklären können. Es wird weiter deutlich, dass die beiden Testgebiete sich erheblich unterscheiden. Dieser Unterschied wird im darauffolgenden Kapitel auf messbare biophysikalische Parameter zurückgeführt.

Nachdem die radiometrische Korrektur insofern erfolgreich durchgeführt werden konnte, dass die einzelnen Datensätze als unabhängige Schätzungen der selben Grundgesamtheit angesehen werden können, werden im Folgenden das erste und zweite Modell parametrisiert.

$$\text{Modell 1: } \sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^f$$

$$\text{Modell 2: } \sigma = \sigma_{ref} \cdot (\delta B)^{(f+c_1 \cdot ((\delta B)-1))}$$

Die Modelle werden für die Streumechanismen Volumenstreuung ($1/\sqrt{2}(HV + VH)$), Oberflächenstreuung ($1/\sqrt{2}(HH + VV)$) und Zweifachreflexion (*double bounce*) ($1/\sqrt{2}(HH - VV)$) parametrisiert. Die Normierungen mit $1/\sqrt{2}$ folgen aus der Energieerhaltung des Streuvektors. Der Vorteil der Verwendung der Streumechanismen ist die einfachere Interpretierbarkeit der Resultate.

3.5.1 Volumenstreuung

Hinwil

In ABB. 3.18 wird die Volumenstreuung der verfügbaren Stichproben zum durch das Kantonale Forstinventar geschätzten Biomassevolumen in Beziehung gesetzt. Die Stichproben 8 und 9 wurden aufgrund ihrer extremen Exposition und der atypisch geringen Biomasse ausgeschlossen. Die Schätzung der Rückstreuung erfolgte in einem Datenfenster, das der in die *slant range*-Geometrie projizierte Stichprobenfläche entspricht. Eine Waldstichprobe wird so durch ca. 150 Pixel abgedeckt. Für die Projektion der Stichprobenfläche wurden die Fluglinien-Informationen und ein hochauflösendes digitales Gelände- bzw. Oberflächenmodell² verwendet. Da die Rückstreuung in der Vegetation und somit im Allgemeinen über dem Bodenniveau stattfindet, wurde für die massgebliche Stichprobenhöhe der Durchschnitt zwischen Geländemodell und Oberflächenmodell verwendet. Dies führt zu einer Verschiebung der Stichprobenfläche in der *slant range*-Geometrie von typischerweise 1 Pixel in *near range*-Richtung.

Im Unterschied zur Mehrheit der Literatur wird im Rahmen des Forstinventars die Biomasse anhand des Stammvolumens geschätzt und nicht in Form der Gesamt- oder Stammbiomasse. Die Umrechnung erfolgt nach [Thürig 08] für die Höhenstufe des Testgebietes mit folgenden Faktoren:

- Umrechnungsfaktor [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$] in [t ha^{-1}]: 0.4
- Umrechnungsfaktor Stammbiomasse in Gesamtbiomasse: 1.47 (Nadelbäume) und 1.55 (Laubbäume)

An dieser Stelle sei [Rauste 94] erwähnt, worin die Abschätzung der Biomasse aus der volumetrischen Messung abweichend mit dem Faktor 1.72 vorgenommen wird. Um die weitere Unsicherheit der Umrechnung von Volumen in Masse zu umgehen, wird in der Folge ausschliesslich das Biomassevolumen verwendet.

Um einen eventuellen Einfluss der Baumart sichtbar zu machen, wurde in den Grafiken zum Testgebiet Hinwil die in den Stichproben vorherrschende Spezies farblich hervorgehoben. Die Farben Blau und Grün stehen dabei für die beiden dominanten Nadelbaumspezies, die Farbe rot für Laubbäume bzw. andere Spezies.

Die vorgestellten Modelle werden nun parametrisiert. Da das dritte Modell im Wesentlichen gleichbedeutend mit dem zweiten ist, beide Modelle zeigen als Zusatzinformation die Änderung

²<http://www.swisstopo.admin.ch/>

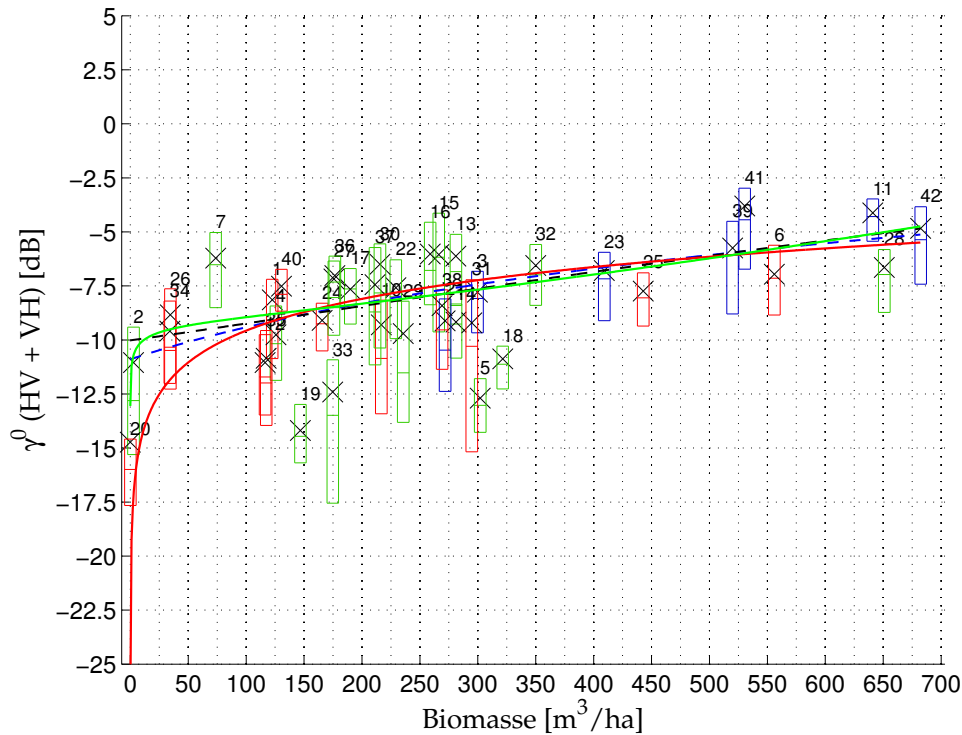


ABB. 3.18: Volumenstreuung aller 40 Stichprobenkreise, *master track*, Testgebiet *Hinwil*. Mittelwerte sind mit einem Kreuzsymbol markiert. Ausgezogene rote Linie: 1. Modell, ausgezogene grüne Linie: 2. Modell, gestrichelte blaue Linie: lineare Regression 1. Grades, gestrichelte schwarze Linie: Regression 2. Grades. Die vorherrschenden Baumarten sind wie folgt gekennzeichnet: grün: Fichte, blau: Tanne, rot: andere.

der Sättigung mit Änderung der Biomasse, wird nur die Parametrisierung des ersten und zweiten Modells wiedergegeben.

In TAB. 3.5 und TAB. 3.6 werden die Modellparametrisierungen basierend auf unterschiedlichen Stichproben dargestellt. Auffällig an den Modellparametrisierungen sind die grossen absoluten Fehler sowie die eher tiefen R^2 -Werte.

Durch die Selektion von geeigneten Stichproben wurde die Ausreisserhäufigkeit reduziert, was in ABB. 3.19 deutlich wird und sich in einem erhöhten R^2 -Wert der Modellparameter in TAB. 3.5 und TAB. 3.6 niederschlägt. Allerdings erhöht sich durch den Ausschluss von Stichproben der absolute Fehler der geschätzten Parameter, da die Zahl der noch verbleibenden Stichproben im Testgebiet geringer ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Schätzung ist die Zusammenfassung aller Einzelstichproben zu einer Gesamtstichprobe, was in ABB. 3.20 gezeigt wird. In den Tabellen

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ^2_{red}
Alle Stichproben, Referenztrack DLR	-8.2 ± 0.37	0.489 ± 0.111	0.383	1.036
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> DLR	-8.3 ± 0.34	0.459 ± 0.104	0.402	0.943
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> RSL	-8.2 ± 0.30	0.478 ± 0.091	0.493	0.925
Bedeckung > 40%, Referenztrack DLR	-8.0 ± 0.58	0.632 ± 0.171	0.579	0.489
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> DLR	-7.8 ± 0.52	0.442 ± 0.163	0.422	0.432
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> RSL	-7.8 ± 0.45	0.569 ± 0.133	0.650	0.360
Klassiert, Referenztrack DLR	-8.5 ± 0.55	0.597 ± 0.130	0.793	0.362
Klassiert, alle <i>tracks</i> DLR	-9.6 ± 0.57	0.531 ± 0.138	0.728	0.248
Klassiert, alle <i>tracks</i> RSL	-9.8 ± 0.53	0.599 ± 0.126	0.813	0.247

TAB. 3.5: Parametrisierung des 1. Modells, Kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung), Testgebiet *Hinwil*. $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Modell 2	σ_{ref} [dB]	f	c_1	R^2	χ^2_{red}
Alle Stichproben, Referenztrack DLR	-8.4 ± 0.34	0.269 ± 0.074	0.145 ± 0.047	0.469	0.915
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> DLR	-8.5 ± 0.33	0.274 ± 0.077	0.128 ± 0.047	0.476	0.849
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> RSL	-8.3 ± 0.29	0.290 ± 0.073	0.122 ± 0.043	0.556	0.831
Bedeckung > 40%, Referenztrack DLR	-7.8 ± 0.69	0.496 ± 0.462	0.048 ± 0.162	0.583	0.544
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> DLR	-7.6 ± 0.58	0.296 ± 0.404	0.055 ± 0.150	0.431	0.479
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> RSL	-7.7 ± 0.53	0.449 ± 0.352	0.044 ± 0.125	0.655	0.399
Klassiert, Referenztrack DLR	-8.5 ± 0.39	0.288 ± 0.117	0.140 ± 0.053	0.885	0.229
Klassiert, alle <i>tracks</i> DLR	-9.6 ± 0.52	0.325 ± 0.168	0.095 ± 0.075	0.772	0.237
Klassiert, alle <i>tracks</i> RSL	-9.8 ± 0.42	0.340 ± 0.135	0.117 ± 0.059	0.874	0.190

TAB. 3.6: Parametrisierung des 2. Modells, Kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung), Testgebiet *Hinwil*. $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

ist diese Schätzmethode als «klassiert» gekennzeichnet. Wie deutlich wird, sind die R^2 -Werte so behandelter Daten am höchsten.

Die gefundene Volumenstreuung fügt sich gut in die aus der Literatur bekannten Ergebnisse ein. Der Verschiebungsparameter σ_{ref} ist mit typischerweise -8 dB (entspricht $\sim -11 \text{ dB}$ wenn nur ein kreuzpolarer Kanal betrachtet wird) nahe bei den bisher gefundenen Resultaten, wenn auch im höheren Bereich. Die Steigung der Modellkurve ist geringer als in anderen Testgebieten,

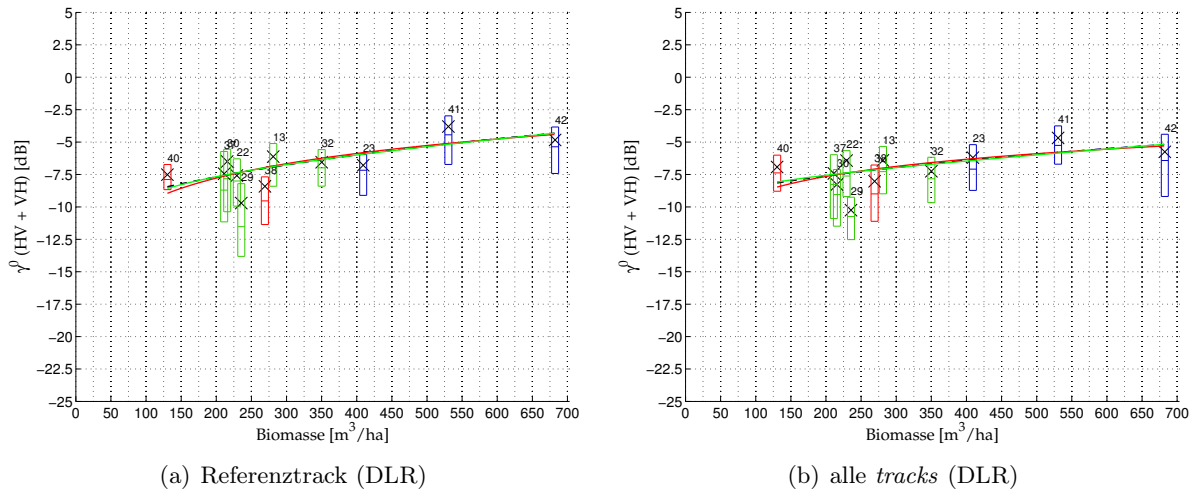


ABB. 3.19: Volumenstreuung aller Stichprobenkreise mit mehr als 40% Bedeckung, Testgebiet *Hinwil*. Mittelwerte sind mit einem Kreuzsymbol markiert. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, blau: lineare Regression 1. Grad, schwarz: lineare Regression 2. Grad

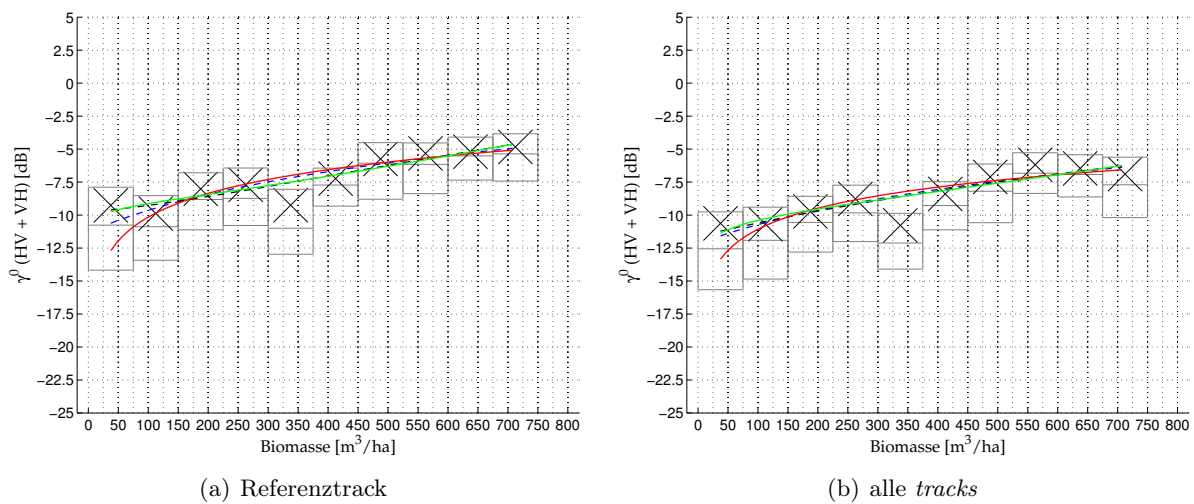


ABB. 3.20: Volumenstreuung aller zusammengefasster Stichprobenkreise, Testgebiet *Hinwil*. Mittelwerte sind mit einem Kreuzsymbol markiert. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grad, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grad.

aber deutlich höher als in den Fällen, wo eine sehr starke Sättigung auftritt. Die gefundene Korrelation liegt mit typischerweise $R^2 \sim 0.6$ bei der Verwendung der Stichproben mit Bedeckungsgrad $> 40\%$ in einem mit den in TAB. 3.1 gezeigten neueren Untersuchungen vergleichbaren Bereich. Auffallend ist, dass die Korrelation älterer Untersuchungen höher liegt, was damit erklärt werden kann, dass die älteren Systeme teilweise eine gegenüber dem E-SAR-System geringere Auflösung hatten oder in den Untersuchungen die Daten stark gemittelt wurden. Beides kann die Korrela-

tion erhöhen. Dies zeigt auch die im Testgebiet gefundenen hohen Korrelationen $R > 0.9$ für die klassierten Stichproben.

Volumenstreuung Krycklan

In ABB. 3.21 wird die Parametrisierung der Volumenstreuung der beiden Testgebiete t01 und t02 gezeigt. Die Stichproben, die sich als instabil erwiesen haben, d.h. deren Werte sich um mehr als 4 dB unterscheiden (Fluglinie 0103x1 und 0104x1, 20 Stichproben von 274) bzw. um mehr als 2 dB (Fluglinien 0301x1 bis 0305x1, 11 Stichproben von 64), fließen nicht in die Modellparametrisierung ein. Die Modellparameter werden in TAB. 3.7 und TAB. 3.8 gezeigt.

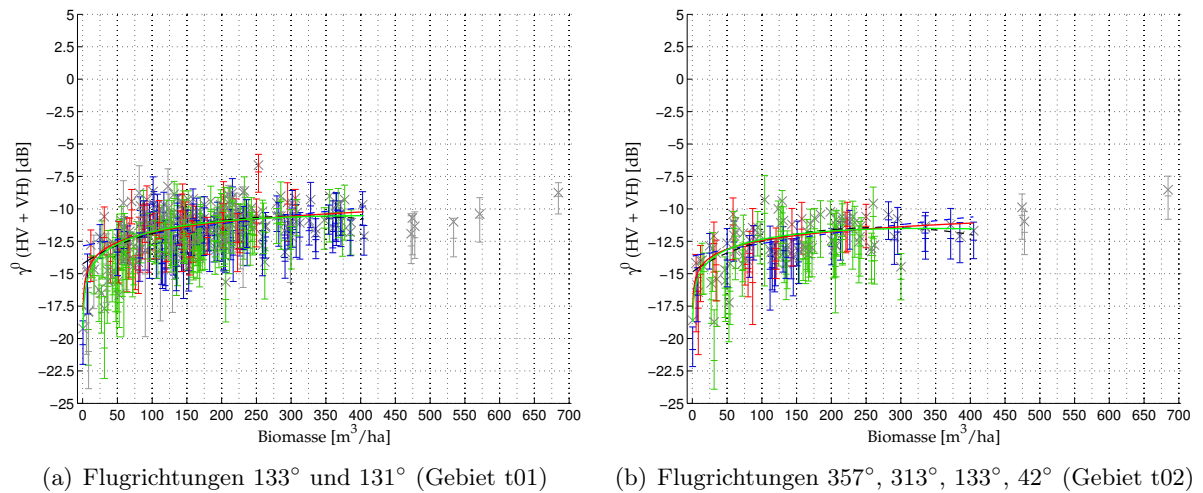


ABB. 3.21: Volumenstreuung, alle stabilen Stichproben im Testgebiet *Krycklan*. Mittelwerte sind mit einem Kreuzsymbol markiert. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grad, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grad. Die Farben der Stichprobensymbole verdeutlicht die Spezies.

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ^2_{red}
Testgebiet t01	-11.1 ± 0.08	0.259 ± 0.032	0.238	0.784
Testgebiet t02	-11.8 ± 0.13	0.223 ± 0.041	0.292	0.548

TAB. 3.7: Parametrisierung des 1. Modells, Kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung), Testgebiet *Krycklan*. $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Modell 2	σ_{ref} [dB]	f	c	R^2	χ_{red}^2
Testgebiet t01	-11.0 \pm 0.10	0.238 \pm 0.037	-0.077 \pm 0.061	0.243	0.782
Testgebiet t02	-11.8 \pm 0.15	0.173 \pm 0.065	-0.094 \pm 0.091	0.300	0.548

TAB. 3.8: Parametrisierung des 2. Modells, Kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung), Testgebiet Krycklan. $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

3.5.2 Kopolare Mechanismen

Testgebiet Hinwil

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Integration der kopolaren Kanäle (HH, VV) die Regression verbessern kann [Rignot 95] [Saatchi 11b]. Allerdings wird in der Untersuchung von Sandberg et al. [Sandberg 11] eine fehlende Korrelation zwischen VV-Kanal und Biomasse festgestellt, im Gegensatz zu Neumann et al. [Neumann 12], welche für den VV-Kanal sogar eine höhere Korrelation als für den HH-Kanal feststellen.

In diesem Abschnitt werden nicht die kopolaren Kanäle alleine untersucht, sondern der Zusammenhang zwischen kopolaren Streumechanismen, also Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion (*double bounce*), und Biomasse wird dargestellt. Zur Definition der kopolaren Streumechanismen vgl. KAPITEL 2.3.5.

Der Zusammenhang zwischen kopolaren Streumechanismen und Biomasse gleicht im Testgebiet Hinwil grundsätzlich dem Zusammenhang zwischen Volumenstreuung und Biomasse. Beide Streumechanismen nehmen an Intensität zu, wenn die Biomasse zunimmt. Eine Schätzung des Zusammenhangs ist auf Grund des starken Rauschens nur eingeschränkt möglich, eine numerische Aussage ist auf Grund der unzureichenden R^2 und χ_{red}^2 -Werten sehr unsicher. Die Ausreisser sind in den kopolaren Streumechanismen häufiger und deutlicher sichtbar, die Ausreisserhäufigkeit lässt sich auch hier durch die Einschränkung der Stichproben auf Grund ihres Bedeckungsgrades reduzieren, was in ABB. 3.22 gezeigt wird.

Wird das erste Modell auf die kopolaren Daten angewendet, folgen die in TAB. 3.9 und TAB. 3.10 gezeigten Werte. Die Parameter des zweiten Modells enthalten keine weiterführende Informationen und werden daher nicht gezeigt.

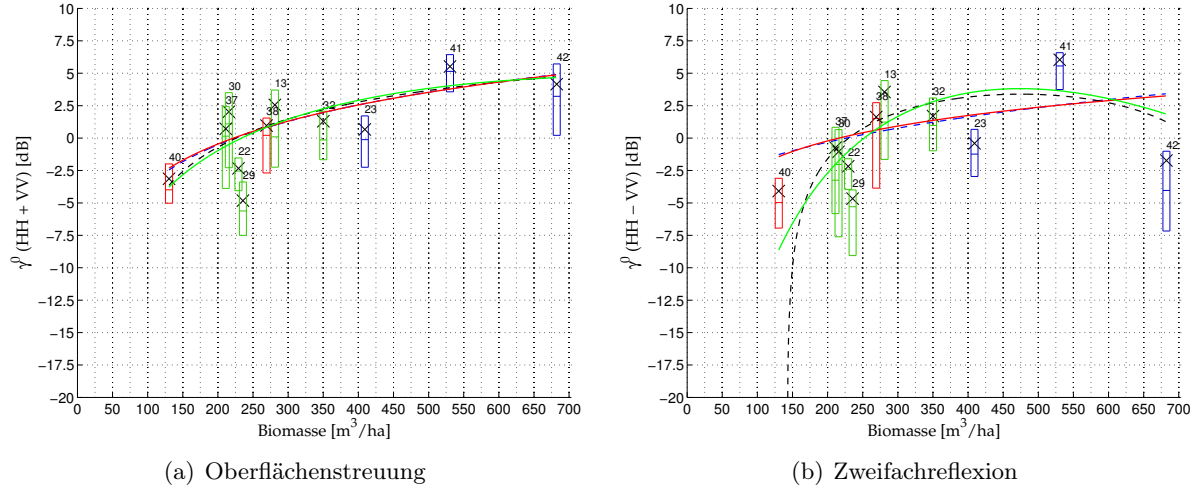


ABB. 3.22: Kopolare Streumechanismen, Referenz-track, Stichprobenkreise mit mehr als 40% Bedeckung, Testgebiet *Hinwil*. Mittelwerte sind mit einem Kreuzsymbol markiert. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grades, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grades.

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ^2_{red}
Alle Stichproben, Referenztrack DLR	-1.2 ± 0.67	0.505 ± 0.209	0.181	2.104
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> DLR	-1.4 ± 0.68	0.518 ± 0.212	0.179	2.096
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> RSL	-1.4 ± 0.52	0.485 ± 0.163	0.247	1.828
Bedeckung > 40%, Referenztrack DLR	-0.7 ± 1.01	1.001 ± 0.277	0.605	0.798
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> DLR	-1.0 ± 1.05	1.020 ± 0.287	0.595	0.814
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> RSL	-1.3 ± 0.77	0.970 ± 0.205	0.717	0.545
Klassiert, Referenztrack DLR	-2.2 ± 1.55	0.822 ± 0.399	0.442	1.466
Klassiert, alle <i>tracks</i> DLR	-3.6 ± 1.64	0.876 ± 0.423	0.439	0.935
Klassiert, alle <i>tracks</i> RSL	-3.8 ± 1.33	0.821 ± 0.335	0.532	0.762

TAB. 3.9: Parametrisierung des 1. Modells, Oberflächenstreuung, Testgebiet *Hinwil*.
 $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Testgebiet Krycklan

Auch für die kopolaren Mechanismen Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion wird hier gezeigt, inwiefern eine noch bestehende Einfallswinkelabhängigkeit und/oder Mie-Oszillationen zu einer Instabilität in der Schätzung führen. Zugelassen werden in diesem Teil nur die Stichproben, die sich für die Volumenstreuung im vorhergehenden Abschnitt als stabil erwiesen haben. Die

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ^2_{red}
Alle Stichproben, Referenztrack DLR	-1.0 ± 0.67	0.346 ± 0.220	0.105	2.989
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> DLR	-1.3 ± 0.65	0.336 ± 0.211	0.105	2.610
Alle Stichproben, alle <i>tracks</i> RSL	-1.3 ± 0.48	0.319 ± 0.153	0.169	1.992
Bedeckung > 40%, Referenztrack DLR	-0.4 ± 1.57	0.652 ± 0.516	0.178	2.961
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> DLR	-0.8 ± 1.41	0.708 ± 0.444	0.243	2.100
Bedeckung > 40%, alle <i>tracks</i> RSL	-1.0 ± 1.00	0.654 ± 0.306	0.359	1.429
Klassiert, Referenztrack DLR	-1.2 ± 1.04	0.295 ± 0.277	0.157	1.405
Klassiert, alle <i>tracks</i> DLR	-2.5 ± 1.02	0.329 ± 0.267	0.190	0.625
Klassiert, alle <i>tracks</i> RSL	-2.8 ± 0.72	0.376 ± 0.182	0.413	0.421

TAB. 3.10: Parametrisierung des 1. Modells, Zweifachreflexion, Testgebiet *Hinwil*.
 $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Stichproben, die sich als instabil erwiesen haben, d.h. deren Werte der Volumenstreuung sich um mehr als 4 dB unterscheiden in der Fluglinie 0103x1 und 0104x1 (20 Stichproben von 274) bzw. um mehr als 2 dB in den Fluglinien 0301x1 bis 0305x1 (11 Stichproben von 64), fliessen nicht in die Modellparametrisierung ein.

Die grossen Abweichungen werden auch in den folgenden Darstellungen deutlich. In ABB. 3.23 wird die Oberflächenstreuung mit den parametrisierten Modellen in TAB. 3.11 und TAB. 3.12 gezeigt. Grundlage sind die beiden Fluglinien des Testgebietes t01 und die gemittelten fünf Fluglinien des Testgebietes t02. In 3.24 und in TAB. 3.13 und TAB. 3.14 wird in gleicher Art die Zweifachreflexion dargestellt.

Die Steigung der Regressionskurve für die Oberflächenstreuung wird nur durch die Stichproben mit tiefer Biomasse aufrechterhalten, was das zweite Modell in TAB. 3.12 deutlich zeigt. Für höhere Biomassen wird der Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse schwächer. Die Parametrisierung ist in Anbetracht des Parameter-Standardfehlers zwischen den beiden Testgebieten t01 und t02 vergleichbar.

Der gefundene Zusammenhang zwischen Zweifachreflexion und Biomasse ist höher als für die Oberflächenstreuung, der höhere Wert wird mit Blick auf die ebenfalls grössere Streuung in diesem Streumechanismus allerdings relativiert. Die Übereinstimmung zwischen den beiden Testgebieten t01 und t02 ist im Rahmen der Standardfehler auch für diesen Streumechanismus gewährleistet.

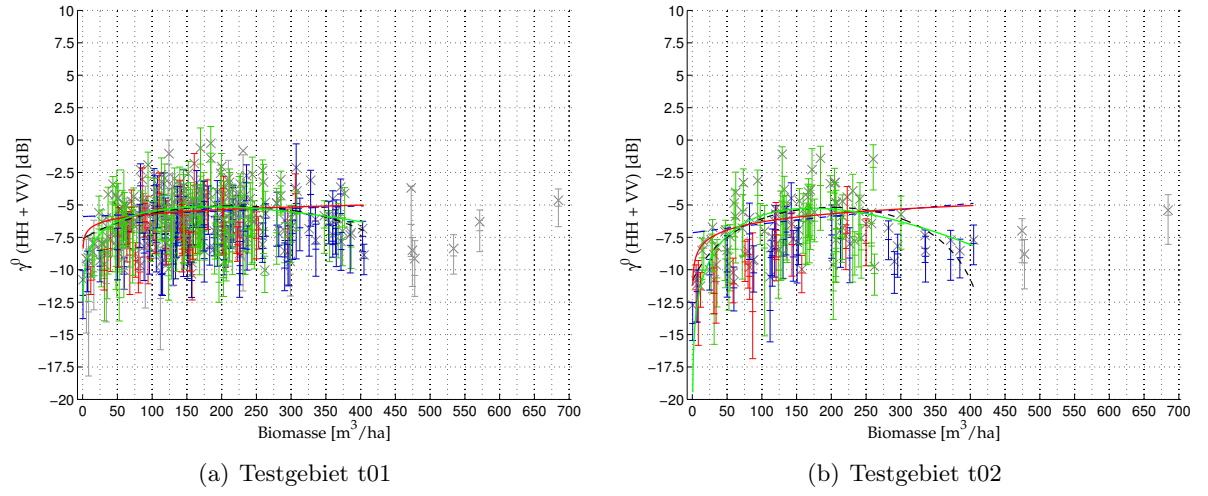


ABB. 3.23: Oberflächenstreuung, Testgebiet *Krycklan*. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grad, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grad.

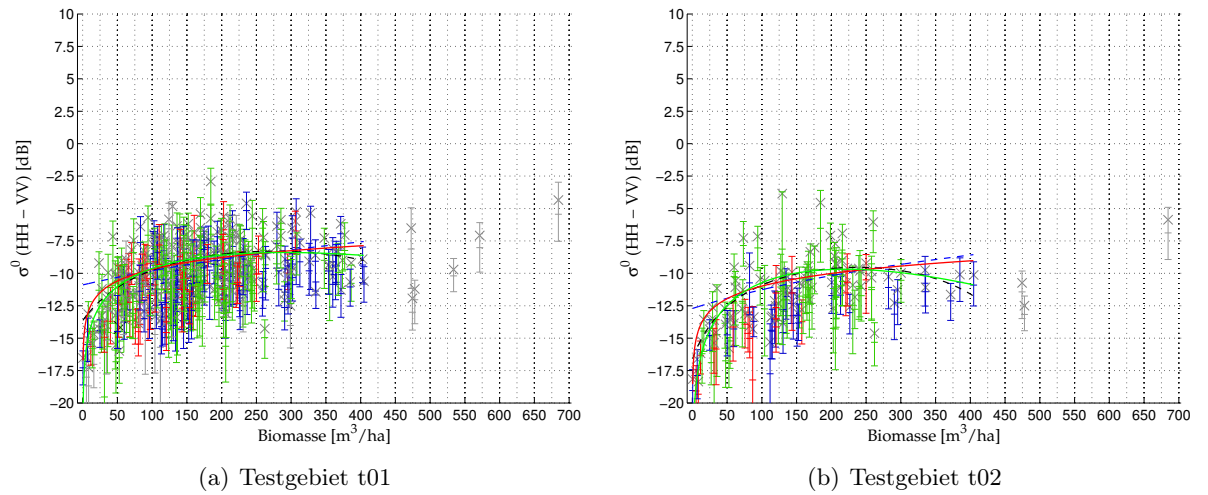


ABB. 3.24: Zweifachreflexion, Testgebiet *Krycklan*. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grad, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grad.

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ^2_{red}
Testgebiet t01	-5.4 ± 0.12	0.114 ± 0.042	0.035	1.149
Testgebiet t02	-5.7 ± 0.24	0.210 ± 0.074	0.114	1.296

TAB. 3.11: Parametrisierung des 1. Modells, Oberflächenstreuung, Testgebiet *Krycklan*. $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Modell 2	σ_{ref} [dB]	f	c	R^2	χ_{red}^2
Testgebiet t01	-5.2 ± 0.14	-0.015 ± 0.062	-0.293 ± 0.097	0.074	1.107
Testgebiet t02	-5.3 ± 0.25	-0.107 ± 0.144	-0.652 ± 0.220	0.214	1.161

TAB. 3.12: Parametrisierung des 2. Modells, Oberflächenstreuung, Testgebiet *Krycklan*.
 $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2	χ_{red}^2
Testgebiet t01	-8.9 ± 0.13	0.301 ± 0.054	0.139	1.403
Testgebiet t02	-10.1 ± 0.27	0.324 ± 0.099	0.152	1.782

TAB. 3.13: Parametrisierung des 1. Modells, Zweifachreflexion, Testgebiet *Krycklan*.
 $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

Modell 2	σ_{ref} [dB]	f	c	R^2	χ_{red}^2
Testgebiet t01	-8.7 ± 0.16	0.257 ± 0.062	-0.211 ± 0.107	0.153	1.386
Testgebiet t02	-9.7 ± 0.30	0.158 ± 0.149	-0.433 ± 0.242	0.185	1.730

TAB. 3.14: Parametrisierung des 2. Modells, Zweifachreflexion, Testgebiet *Krycklan*.
 $B_{ref} = 187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, entspricht 75 t ha^{-1} .

3.5.3 Übersicht

Die bis hierhin gezeigten Resultate belegen, dass die Korrelation zwischen Rückstreuung in allen Streumechanismen und der erhobenen Biomasse erhöht werden kann, wenn nur solche Stichproben berücksichtigt werden, deren Flächen gleichförmig durch Bäume bedeckt sind. Ein minimaler Bedeckungsgrad von 40% bringt im Testgebiet Hinwil vor allem für die Oberflächenstreuung eine erhebliche Verbesserung der Korrelation mit sich, im Fall der Volumenstreuung wird die Korrelation geringfügig erhöht, aber vor allem wird die Streuung der Residuen reduziert. Die Stichprobenauswahl bringt allerdings auch eine Einschränkung der verfügbaren Stichproben mit sich, so dass für das Testgebiet Hinwil die Datengrundlage kleiner wird.

Im Testgebiet Hinwil zeigen die gefundenen Korrelationen nach der Stichprobenauswahl für die Volumenstreuung und die Oberflächenstreuung hohe, für die Zweifachreflexion erstaunlich tiefe Werte. Dies widerspricht direkt den Ergebnissen von Neumann et al. [Neumann 12], welche zeigen, dass die Korrelationen des kreuzpolaren Kanals und der Zweifachreflexion hoch sind, die

Oberflächenstreuung aber nur schwach korreliert. Teilweise bestätigt wird die Feststellung durch die Resultate in Sandberg et al. [Sandberg 11].

Aus methodischer Sicht ergibt sich ausserdem, dass die Mittelung mehrere Fluglinien sich stark in den beiden unterschiedlichen Prozessierungen unterscheidet. Werden die koregistrierten DLR-Daten gemittelt, sinkt die Korrelation und die Streuung wird grösser. Werden die nicht-koregistrierten Daten der RSL-Prozessierung gemittelt, werden mit dem DLR-Referenzdatensatz gut übereinstimmende Werte gefunden. Ausserdem nimmt, wie erwartet, die Streuung ab und die Korrelation zu. Eine Erklärung für diese Feststellung ist, dass die koregistrierten Daten auf Grund des *resampling* für die Koregistrierung radiometrisch so verändert werden, dass die kleinskalige Beprobung durch die Stichprobenflächen stark abweichende Resultate liefert. Ein Fehler in der Positionierung der Stichproben kann ausgeschlossen werden, da die koregistrierten Daten alle in derselben Geometrie vorliegen und somit die Positionierung aus dem Referenzdatensatz direkt übernommen werden kann. Als Empfehlung kann daraus abgeleitet werden, dass zur Schätzung einer Stichprobe möglichst unabhängige SLC-Datensätze mit eigener Geometrie verwendet werden sollten.

Im Vergleich mit den Daten des Testgebietes Hinwil zeigt sich im Testgebiet Krycklan, dass der Zusammenhang zwischen Volumenstreuung und Biomasse schwächer ausfällt. Die Korrelation ist deutlich geringer, was übereinstimmend in [Soja 13] festgestellt wird. Bei genauerer Betrachtung wird sogar deutlich, dass die Korrelation nur durch die Stichproben mit tiefer Biomasse (typischerweise unter $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) aufrecht erhalten wird. Stichproben mit höherer Biomasse lassen nur einen schwachen Zusammenhang zwischen Biomasse und Rückstreuung erkennen. Das zweite Modell zeigt dies am negativen Parameter c . Das bedeutet, dass mit steigender Biomasse der Zusammenhang zwischen Biomasse und Rückstreuung geringer wird. Die Übereinstimmung zwischen den beiden Fluglinien, die Testgebiet t01 abdecken (das Testgebiet t02 ist ebenfalls darin enthalten) und den fünf Fluglinien des Testgebietes t02 ist unter Berücksichtigung der Fehlerintervalle der Parameter-Standardfehler gewährleistet. Dies steht im Widerspruch zu, *final report* [Hajsek 09], worin eine fehlende Vergleichbarkeit der semi-empirischen Parametrisierung der Biomasse-Rückstreuungsbeziehung zwischen den beiden Testgebieten festgestellt wird.

Eine systematische Beeinflussung der Rückstreuung durch die Baumart kann ausgeschlossen werden.

Auch nach Berücksichtigung der Eignung der Stichproben sowie methodischer Effekte bleiben Residuen, die erklärt werden müssen. Diese Residuen werden daher im nächsten Abschnitt in Beziehung gesetzt zu biophysikalischen Parametern.

3.6 Residuen und Strukturparameter

Ziel der folgenden Analyse ist es, die Parameter darzustellen, durch welche sich Stichproben von der Regressionskurve entfernen. Als Residuum wird die Differenz zwischen Stichprobenmittelwert und dem Wert des ersten Modells bezeichnet:

$$\text{Residuum[dB]} = \gamma^0(\text{Stichprobe})[\text{dB}] - \gamma^0(1. \text{ Modell})[\text{dB}] \quad (3.2)$$

Die Residuenanalyse wird anhand des 1. Modells vorgenommen, obwohl das zweite Modell eine bessere Anpassung an die Daten erlauben würde. Die Begründung dafür ist, dass der Residuenkorrigierte Modellparameter f im folgenden Kapitel als Referenzwert benötigt wird, um den Zusammenhang zwischen Ausdünnung und Rückstreuung zu erklären. Die Residuenanalyse anhand des 2. Modells führt qualitativ zu weitgehend übereinstimmenden Ergebnissen für die Oberflächenstreuung und Volumenstreuung. Die Daten des Testgebietes Hinwil führen aber auf Grund von Ausreißern zu einer Parametrisierung des 2. Modells für die Zweifachreflexion, welche die Residuen stark verzerrt (vgl. ABB. 3.22(b)). Im ANHANG D.8 werden die Residuen des 2. Modells in Abhängigkeit der Strukturparameter gezeigt.

Testgebiet Hinwil

Auffällig ist, dass die Stichproben im Testgebiet Hinwil sowohl in der kreuzpolaren Rückstreuung als auch in der Oberflächenstreuung eine deutliche Korrelation mit der Biomasse zeigen. Eine Ausnahme bildet die Stichprobe 29. In der Zweifachreflexion weicht die Stichprobe 42 deutlich von der Regression ab, dies im Gegensatz zu den anderen Streumechanismen, in welchen auch Stichprobe 42 gut in die Regression passt. Das heisst, dass es einen Mechanismus geben muss, der abhängig ist vom Streumechanismus und dazu führt, dass sich die gemessene Rückstreuung ändert.

Die folgende Analyse der Residuen basiert auf dem Referenzdatensatz 06swisar0109x1 der DLR-Prozessierung. Nur die Stichproben mit einem Bedeckungsgrad $> 40\%$ (vgl. 3.9) wurden zugelassen.

Da [Soja 13] gezeigt hat, dass sich die Regression unter Mitberücksichtigung der Topographie verbessern lässt, wird dazu in einem ersten Schritt die Geländesteigung berücksichtigt. Dabei wird in Abweichung zur Methodik von Soja et al., wo nur der absolute Betrag der Neigung berücksichtigt wird, zwischen der Neigung der Fallinie, der Neigung in *range*-Richtung (quer zur Flugrichtung) und der Neigung in Azimutrichtung (entlang der Flugrichtung) unterschieden. Diese Unterscheidung folgt aus der Überlegung, dass die Bodenneigung zum Sensor hin oder vom Sensor weg sich anders auswirkt als die Bodenneigung senkrecht zur Sichtachse des Sensors (LOS). Im ersten Fall ist eine stärkere Beeinflussung der Rückstreustärke zu erwarten, der zweite Fall kann polarimetrisch wirksam sein, indem der geneigte Boden zur Polarisationsdrehung führt.

In ABB. 3.25 sind die nicht-standardisierten Residuen der kopolaren Mechanismen Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion in Abhängigkeit der verschiedenen Neigungen dargestellt. In ABB. 3.26 wird die kreuzpolare Streuung (Volumenstreuung) gezeigt. Die Ausreisser-Stichproben 29 und 42 sind als rote Kreuzsymbole hervorgehoben.

Aus der Darstellung kann abgeleitet werden, dass die zwei Ausreisser-Stichproben den grössten negativen Wert der *range*-Neigung aufweisen. Das Gelände ist deutlich vom Sensor weg geneigt. Dass dies zu tiefen Werten in allen Streumechanismen führen kann, ist nachvollziehbar. Gut zu sehen ist weiter in ABB. 3.26, dass die kreuzpolare Streuung verglichen mit den anderen Streumechanismen die kleinsten Residuen in den zwei Stichproben zeigt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass in der kreuzpolaren Streuung ein grosser Teil der Streuung direkt aus dem Vegetationsvolumen stammt.

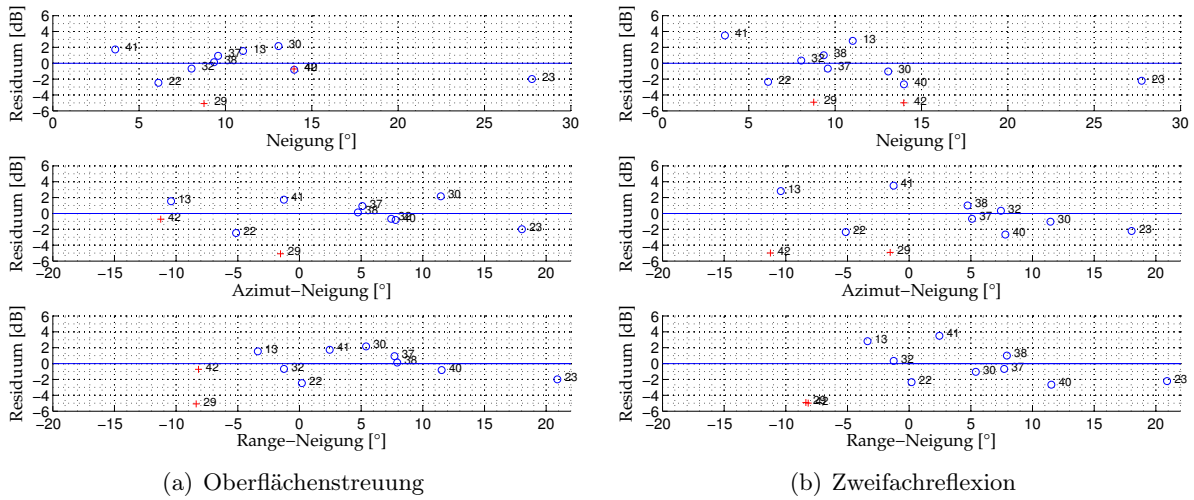


ABB. 3.25: Residuen des 1. Modells, kopolare Streumechanismen, Testgebiet *Hinwil*, in Abhängigkeit der Topographie.

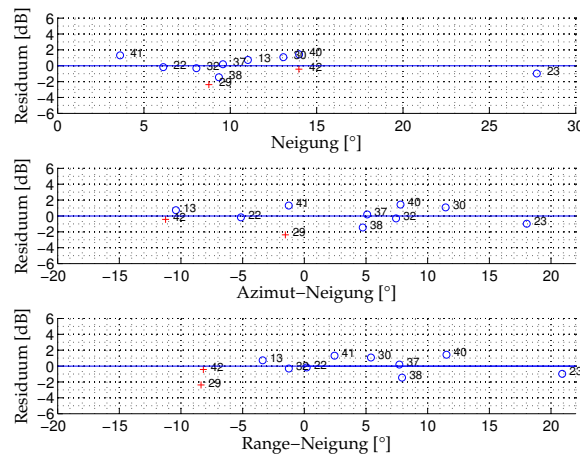


ABB. 3.26: Residuen des 1. Modells, kreuzpolare Streuung, Testgebiet *Hinwil*, in Abhängigkeit der Topographie.

Allerdings ist die hier vermutete Abhängigkeit der Residuen von der Neigung in *range*-Richtung ein voreiliger Schluss, wie in der Folge gezeigt wird. Als Erklärung für die Residuen wurden die im Rahmen des Kantonalen Forstinventars [Bau09] erhobenen Strukturparameter auf einen Zusammenhang mit den Residuen untersucht. Qualitativ wurde ein Zusammenhang zwischen Residuen und gewissen Strukturparameter gefunden, andere zeigen ausgesprochen keinen Zusammenhang oder eine Aussage ist nicht möglich, weil der Parameter im Testgebiet keine Variabilität aufweist. In TAB. 3.15 ist ein Überblick der qualitativen Untersuchung gezeigt.

Zusammenhang vermutet	kein Zusammenhang ersichtlich	keine Aussage möglich (homogene Datenbasis)
Baumschicht	Mischungsgrad	Waldform
Kronenlänge	Bestandesstruktur	
Kronenform	Schlussgrad	
Entwicklungsstufe		

TAB. 3.15: Qualitative Zusammenhänge zwischen Strukturparametern und Residuen, Testgebiet *Hinwil*.

Die Parameter, für die ein Zusammenhang vermutet wird, können zusammen mit der *range*-Neigung in ein lineares Modell einfließen, das die Residuen als abhängige Variable erklärt. Die eigentlich nominalskaligen Parameterwerte werden dabei als Rangwerte betrachtet und in den einzelnen Plots arithmetisch gemittelt. Für die Modellanalyse wird der Wertebereich der einzelnen Skalenwerte (vgl. TAB. 2.7 und TAB. 2.8) daher auf das Intervall 0...1 skaliert. Das lineare Modell ergibt im Unterschied zur qualitativen Analyse nur für jeweils einen Parameter einen signifikanten (5%-Kriterium) Einfluss auf die Residuen. Für Oberflächenstreuung und Volumenstreuung ist der Parameter die Schichtung, für die Zweifachreflexion die Kronenlänge. Die anderen Parameter sowie Interaktionen zwischen den Parametern, so auch die *range*-Neigung, halten dem Signifikanzkriterium nicht stand. Das Resultat des linearen Modells ist in ABB. 3.27 gezeigt.

Das Ergebnis dieser Residuenanalyse zeigt, dass die Rückstreuung in erster Linie empfindlich auf die Struktur der Vegetation ist. Die Residuen der Streumechanismen Oberflächenstreuung und Volumenstreuung sind negativ, wenn mehr Einzelbäume in tieferen Baumschichten vorhanden sind (höherer Wert des Parameters Baumschicht). Gegenüber der Modellanpassung ist die Rückstreuung zu schwach. Die Zweifachreflexion hingegen fällt stärker aus als durch das Modell beschrieben, wenn die Kronenlänge kürzer wird (höherer Parameterwert). Beides sind nachvollziehbare Mechanismen. Wenn die Kronenlänge kurz ist, bedeutet das, dass ein grosser Anteil der Baumhöhe aus dem nackten Stamm besteht. Die Möglichkeit für eine Zweifachreflexion ist dadurch höher. Treten Bäume auch in tieferen Baumschichten auf, verringert sich die Chance, dass das Signal als kohärente Welle den Boden erreichen kann. Dies reduziert die direkte Oberflächenstreuung vom Boden, aber auch direkt von Stämmen. Die Volumenstreuung nimmt offenbar auch ab, wenn das Volumen sich über mehrere Schichten erstreckt. Das kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass das gestreute Signal tieferer Volumenschichten in höherliegenden Schichten

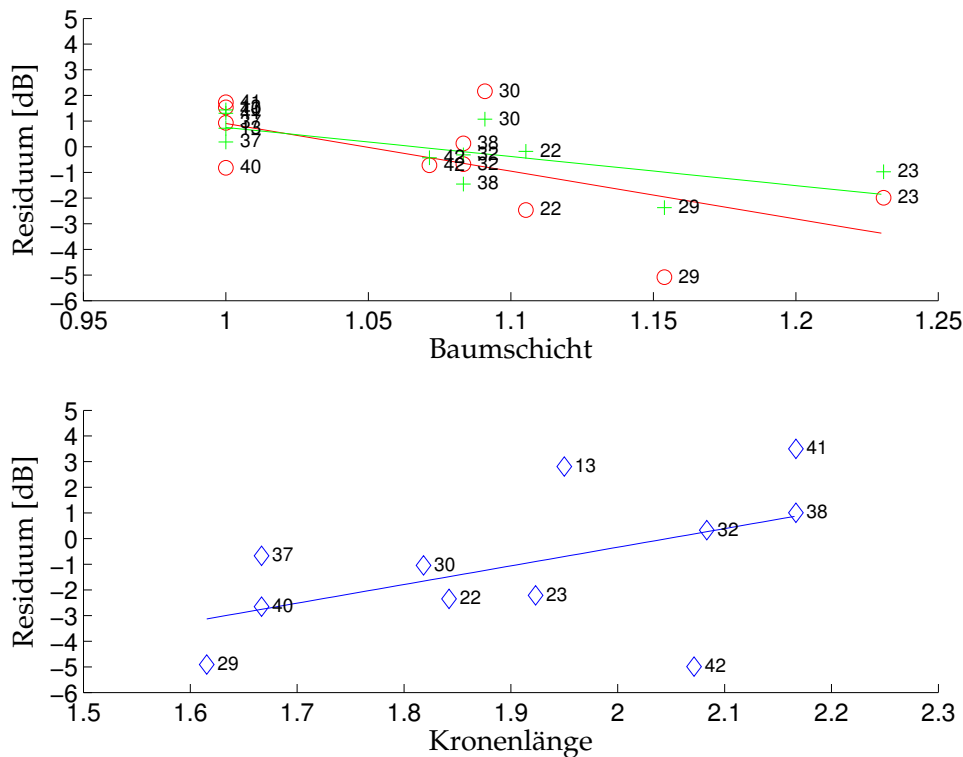


ABB. 3.27: Residuen des 1. Modells in Abhängigkeit von Strukturparametern, Testgebiet *Hinwil*. Oben: Oberflächenstreuung (rot) und Volumenstreuung (grün), unten: Zweifachreflexion (blau). Eine Zunahme des Merkmals Baumschicht bedeutet Verteilung der Baumkronen über mehrere Schichten, eine Zunahme des Parameters Kronenlänge bedeutet kürzere Baumkronen. Testgebiet Hinwil.

teilweise absorbiert oder in eine Richtung vom Sensor weg gestreut wird. Das Ausmass der erklär-
baren Residuenstreuung ist mit einer Grössenordnung von bis zu 4 dB (geschätzt ausgehend vom
linearen Residuen-Modell) durchaus relevant, da diese Abweichung bereits die Grössenordnung
des durch die Variabilität der Biomasse im Testgebiet erwarteten Signals erreicht.

Der Einfluss der Geländeneigung ist mit dieser Beschreibung der Residuen noch nicht ausge-
schlossen. Die Residuen können mittels einfachem linearen Regressionsmodell anhand der Struk-
turparameter korrigiert werden (ABB. 3.27). In ABB. 3.28 sind die verbleibenden Residuen wie-
derum in Abhängigkeit der Geländeneigung dargestellt, nachdem sie durch das lineare Modell
mit der Zugehörigkeit zur Baumschicht als erklärende Variable korrigiert worden sind. Der sich
aufdrängende Schluss ist, dass es im kreuzpolaren Kanal (Volumenstreuung) keinen Einfluss der
Geländeneigung gibt. Sogar die Residuen der Ausreisser-Stichproben werden durch die Korrektur
beseitigt. Allgemein werden die verbleibenden Residuen deutlich geringer.

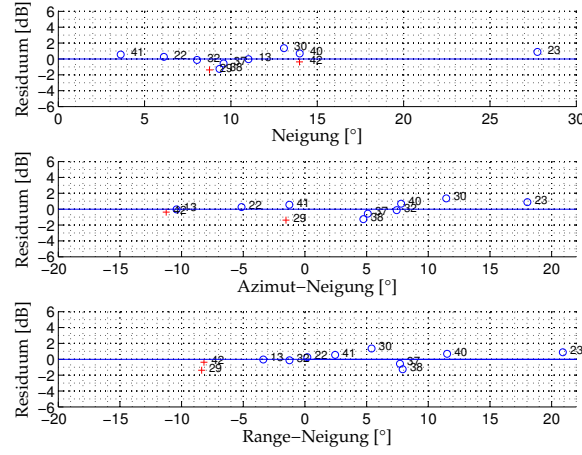


ABB. 3.28: Residuen des 1. Modells, kreuzpolare Streuung, nach Korrektur durch Strukturparameter, Testgebiet *Hinwil*, in Abhängigkeit der Topographie.

Das Bild bei den kopolaren Mechanismen in ABB. 3.29 zeigt, dass durch die Berücksichtigung der Strukturparameter die Residuen reduziert werden können, allerdings nicht in gleichem Ausmass wie bei der Volumenstreuung.

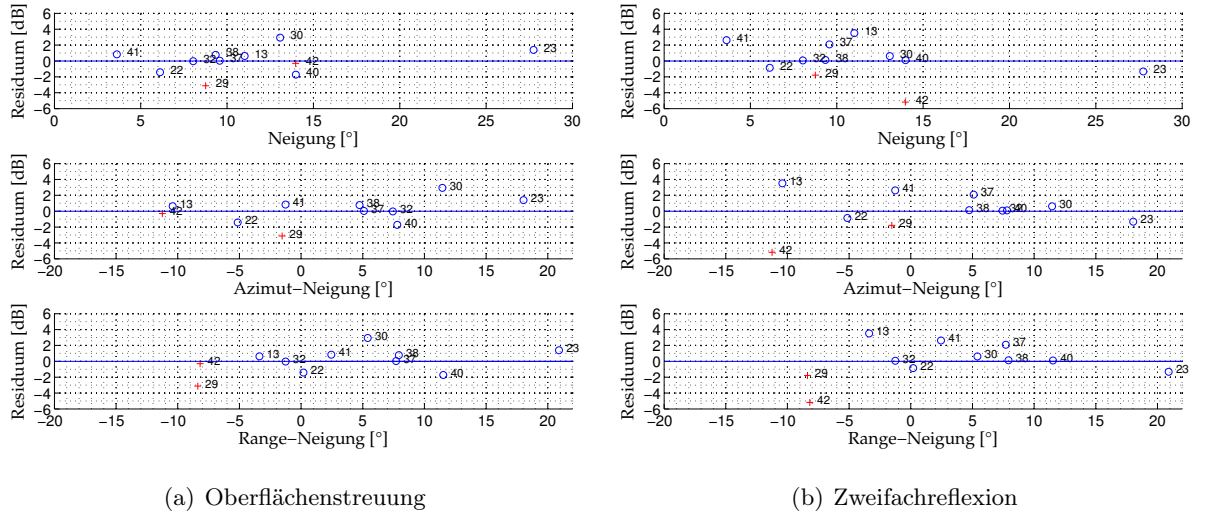


ABB. 3.29: Residuen des 1. Modells, kopolare Streumechanismen, nach Korrektur durch Strukturparameter, Testgebiet *Hinwil*, in Abhängigkeit der Topographie.

Die verbleibenden Residuen erlauben auf der limitierten Datengrundlage des Testgebietes *Hinwil* keine gesicherten Aussagen. Allerdings kann festgestellt werden, dass mit Ausnahme der Ausreisser-Stichproben 29 und 42, die auch durch die Korrektur durch Strukturparameter nicht zufriedenstellend korrigiert werden können, die Zweifachreflexion einen Abnahmetrend bei zu-

nehmender *range*-Neigung zeigt. Die Berücksichtigung der *range*-Neigung kann zu einer weiteren Verbesserung der Modellanpassung für die kreuzpolare Streuung und die Oberflächenstreuung führen, was in 3.16 gezeigt wird. Die Vermutung liegt nahe, dass die hier sichtbare Abhängigkeit von der Neigung auf die nicht perfekte Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit durch die radiometrische Normierung zurückzuführen ist. Dies erklärt, weshalb in der Zweifachreflexion der Einfluss der Neigung am deutlichsten sichtbar ist. Die TAB. 3.3 bestätigt, dass für die Zweifachreflexion nach der radiometrischen Normalisierung, im Unterschied zu den anderen Mechanismen, eine Abweichung in die positive Richtung verbleibt.

In der Tabelle wurde der RMSE hinsichtlich einer Biomasseinversion geschätzt. Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Strukturparameter eine deutliche Verkleinerung der Unsicherheit mit sich bringt. Die Berücksichtigung der *range*-Neigung bringt eine kleinere Verbesserung. Die Schätzung der Biomasse aus der Zweifachreflexion ist auf Grund der geringen Korrelation kaum möglich, eine Korrektur der Residuen reduziert die Korrelation sogar.

Korrekturverfahren	R^2	γ^0 RMSE [m ³ ha ⁻¹]	γ^0 und St R^2 RMSE [m ³ ha ⁻¹]	γ^0 , St und RN R^2 RMSE [m ³ ha ⁻¹]		
kreuzpolare Streuung	0.58	130.45	0.74	86.72	0.78	76.33
Oberflächenstreuung	0.58	126.67	0.74	89.84	0.78	80.36
Zweifachreflexion	0.18	462.63	0.08	1324.52	0.07	1430.84

TAB. 3.16: Korrektur der Residuen des 1. Modells durch Strukturparameter (St) und anschliessend durch die *range*-Neigung (RN), Testgebiet *Hinwil*.

Die linearen Modelle der Residuen ergeben keinen signifikanten Beitrag der *range*-Neigung. Um dennoch zu überprüfen, ob die Korrelation zwischen Residuen und Vegetationsstrukturparametern auf einer Scheinkorrelation beruht, die dadurch entsteht, dass die Vegetationsstrukturmerkmale selbst vom Einfallswinkel abhängig sind (z. B. könnten alle kurzkrönigen Bäume nur in geneigtem Gelände stehen), wird die Residuenkorrektur wiederholt, indem zuerst der Einfallswinkel als erklärende Variable korrigiert wird und erst dann die Vegetationsstrukturmerkmale. Die TAB. 3.16 bestätigt, dass die Strukturmerkmale die massgeblichen Einflussfaktoren sind. Wird zuerst die Geländesteigung korrigiert, ist eine anschliessende Korrektur durch die Strukturmerkmale immer noch effektiver in der Reduktion des RMSE. Wird die Residuenkorrektur in der Reihenfolge 1. *range*-Neigung, 2. Strukturparameter vorgenommen, verbleibt der Fehler (RMSE) hoch.

Korrekturverfahren	R^2	γ^0 RMSE [m ³ ha ⁻¹]	γ^0 und RN R^2 RMSE [m ³ ha ⁻¹]	γ^0 , RN und St R^2 RMSE [m ³ ha ⁻¹]		
kreuzpolare Streuung	0.58	130.45	0.59	127.79	0.60	122.89
Oberflächenstreuung	0.58	126.67	0.59	125.59	0.60	121.42
Zweifachreflexion	0.18	462.63	0.17	476.79	0.17	487.02

TAB. 3.17: Korrektur der Residuen des 1. Modells durch die *range*-Neigung (RN) und anschliessend durch Strukturparameter (St), Testgebiet *Hinwil*.

Schlussfolgerungen der Residuenanalyse

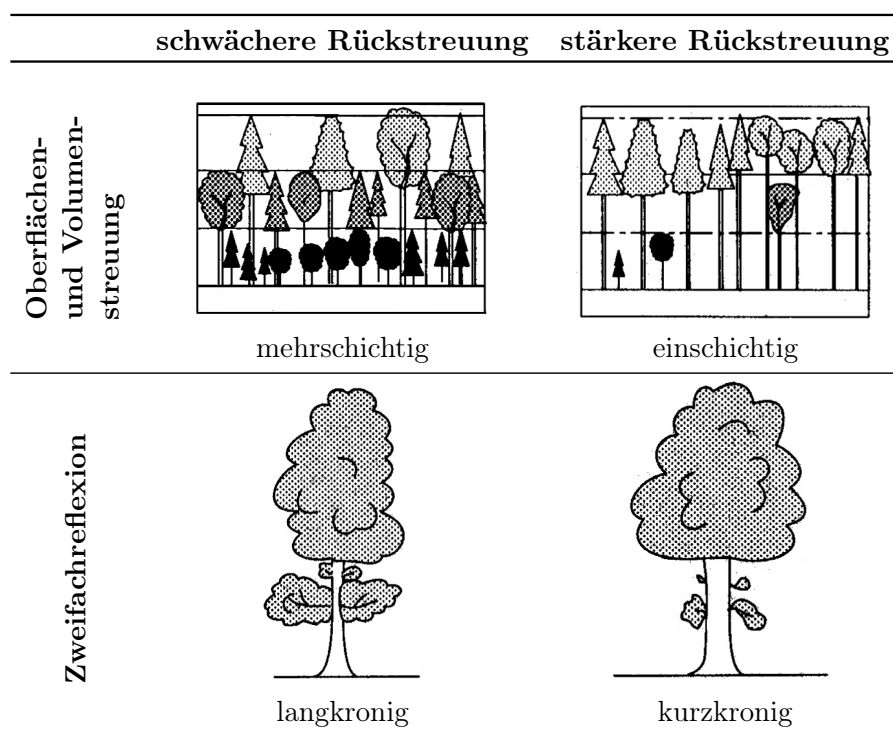
In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse für die Oberflächenstreuung und die Volumenstreuung in erster Linie beeinflusst wird durch Strukturparameter. Wenn die Schichtzugehörigkeit der Einzelbäume stark variiert, resultiert ein schwächeres Rückstreuungssignal. Für die Zweifachreflexion zeigt sich eine geringe Korrelation zwischen Rückstreuung und Biomasse, dafür wird eine Abhängigkeit von der Kronenlänge deutlich, wobei kurze Kronen die Zweifachreflexion begünstigen. Die Abhängigkeit von der Topographie ist für die Oberflächenstreuung und die Volumenstreuung nach der γ^0 -Normierung gering, für die Zweifachreflexion ist eine Abnahme der Rückstreuung für Flächen, die zum Sensor hin geneigt sind, nicht auszuschliessen. Dennoch ist die Neigung als alleinige erklärende Variable für die Residuen nicht haltbar, bestenfalls ist die Neigung ein sekundärer Einflussfaktor.

Eine Aufdatierung der Parametrisierung des 1. Modells in TAB. 3.18 beruht auf dem Referenzdatensatz für Stichproben mit einem Bedeckungsgrad $> 40\%$. Die Werte des korrigierten 1. Modells zeigen, dass die Schätzung aus dem Referenztrack sich den Schätzungen aus den klassierten Stichproben annähert. Auch die hohen Werte für R^2 werden annähernd erreicht. Die Steigung der Modellkurve nimmt nach der Korrektur Werte an, die gut vergleichbar sind mit den Schätzungen aus klassierten Stichproben. So wird die anfänglich sehr hohe Steigung in der Zweifachreflexion auf den Wert korrigiert, der nahe bei der Schätzung aus allen Stichproben und klassierten Stichproben liegt.

Die Schlussfolgerung aus diesem Teil ist, dass die Modellierung und Korrektur der Residuen die Unsicherheit in ähnlichem Mass reduziert wie die Klassierung der Stichproben. Neben der erreichten Verbesserung der Korrelation wurden durch diese Korrektur zwei durch Inventurpa-

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2
Kreuzpolare Streuung ohne Korrektur	-8.0	0.632	0.58
Kreuzpolare Streuung nach Korrektur	-8.9	0.641	0.78
Oberflächenstreuung ohne Korrektur	-0.7	1.001	0.60
Oberflächenstreuung nach Korrektur	-1.4	0.978	0.78
Zweifachreflexion ohne Korrektur	-0.4	0.652	0.18
Zweifachreflexion nach Korrektur	-0.5	0.306	0.07

TAB. 3.18: 1. Modell nach Residuenkorrektur, Testgebiet *Hinwil*. Berücksichtigt wurden nur die Stichproben mit Bedeckungsgrad > 40%



TAB. 3.19: Bildliche Darstellung der Strukturparameter, die zu abweichender Rückstreuung führen. Abbildungen aus [Bau09].

parameter leicht messbare Mechanismen als Erklärung für abweichende Rückstreuwerte gefunden, vgl. ABB. 3.19.

Testgebiet Krycklan

Analog zum Testgebiet Hinwil werden im folgenden Abschnitt die Residuen bezüglich des ersten Modells mittels den zugänglichen Inventurparametern erklärt. Anders als in Hinwil wurden im Testgebiet Krycklan Strukturparameter für alle Waldbestände als Bestandesgrösse vorgenommen und nicht für einzelne Stichproben. Bodenfeuchte-Schätzungen sind nur für ausgewählte Waldbestände ebenfalls als Bestandesgrösse verfügbar. Es ist also damit zu rechnen, dass die Aussagekraft dieser Parameter limitiert ist, da sich im Testgebiet Hinwil gezeigt hat, dass sich die Strukturparameter auch zwischen Stichproben unterscheiden. Im Testgebiet Hinwil haben sich die Strukturparameter Kronenlänge und Schichtung als Residuen erklärend erwiesen, vgl. 3.6. Da in den Inventurdaten des Testgebietes Krycklan diese Parameter nicht direkt verfügbar sind, wurde stattdessen aus den verfügbaren Parametern solche abgeleitet, deren Aussagen möglichst nahe an die beiden Parameter heranreichen. In den folgenden Darstellungen der Residuenabhängigkeit von den Strukturparametern wurden nur die Stichproben zugelassen, die eine Biomasse $> 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aufweisen, um dominierende Effekte von Bodeninteraktionen auszuschliessen. Die grau dargestellten Waldbestände wurden aus der Berechnung der Regressionsgeraden ausgeschlossen, da sie weniger als 3 Stichproben $> 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ beinhalten oder Streuungen zwischen den Stichproben von mehr als 4 dB auftreten.

Schichtung

Der Parameter Schichtung wird aus den Perzentilen der Baumhöhe abgeleitet:

$$\text{Schichtung} = \text{Höhe}_{70} - \text{Höhe}_{30} \quad (3.3)$$

Die Überlegung ist, dass bei einer deutlich ausgeprägten Schichtung die Baumhöhen sich über einen weiten Bereich gleichförmig verteilen, der Perzentilabstand 70% - 30% wird daher gross.

In ABB. 3.30 ist der selbe Einfluss der Mehrschichtigkeit zu erkennen wie bereits im Testgebiet Hinwil festgestellt. Die Volumenstreuung und die Oberflächenstreuung nehmen ab, wenn sich das Vegetationsvolumen über mehrere Schichten erstreckt. Im Unterschied zum Testgebiet Hinwil, wo die Zweifachreflexion nicht signifikant auf die Schichtung reagiert hat, ist anhand des grösseren Daten-*pools* des Testgebietes Krycklan zu sehen, dass auch die Zweifachreflexion in mehrschichtigen Beständen abnimmt.

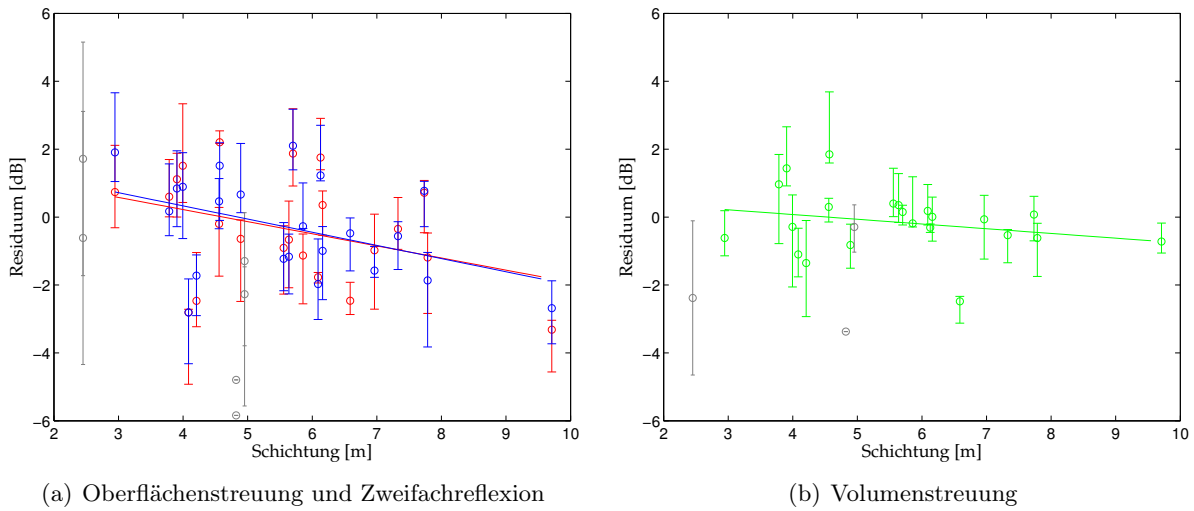


ABB. 3.30: Einfluss der Schichtung, rot: Oberflächenstreuung, blau: Zweifachreflexion, grün: Volumenstreuung, grau: Ausreisser oder ausgeschlossene Stichproben (mehr als 4 dB Streuung oder weniger als 3 Stichproben). Ein höherer Wert entspricht einer ausgeprägteren Mehrschichtigkeit. Fluglinie 0103x1 und 0104x1, Testgebiet *Krycklan*.

Kronenlänge

Die Kronenlänge kann als nominalskaliger Parameter aus der Medianhöhe und dem Ast- und Nadelvolumen abgeleitet werden. Die Überlegung ist die, dass ein Baum modellhaft dann eine lange Krone hat, wenn Äste und Nadeln im Verhältnis zur Baumhöhe einen hohen Anteil ausmachen. Da für diese Rechnung die Baumhöhe durch das Ast/Nadelvolumen dividiert wird, werden die drei Parameter zuerst auf das Intervall $[0 \dots 1]$ skaliert. Als Skalierungsgrösse wird der maximale im Testgebiet erhobene Wert verwendet. Der nominalskalige und nur im Testgebiet als relative Grösse anwendbare Parameter Kronenlänge entspricht also:

$$\text{Kronenlänge} = \frac{\text{Höhe}_{50}}{\max(\text{Höhe}_{50})} / \frac{(\text{Äste} + \text{Nadeln})}{\max(\text{Äste} + \text{Nadeln})} \quad (3.4)$$

Nenner und Zähler wurden so gesetzt, dass das Merkmal mit dem Parameter aus dem Testgebiet Hinwil in der Aussage übereinstimmt: ein hoher Wert bedeutet eine kurze Krone.

In ABB. 3.31 werden die Residuen in Abhängigkeit der Kronenlänge dargestellt. Die Aussage stimmt mit dem im Testgebiet Hinwil gefundenen Zusammenhang gut überein. Kürzere Kronen (höhere Werte) erhöhen die Rückstreuung in der Zweifachreflexion, die Oberflächenstreuung ist kaum beeinflusst. Die Volumenstreuung nimmt in geringerem Ausmass ab, wenn die Krone kürzer

wird. Dies lässt sich damit erklären, dass die Volumenstreuung genau in diesem Kronenvolumen stattfindet, während die kopolaren Mechanismen mehrheitlich auf den Stamm angewiesen sind.

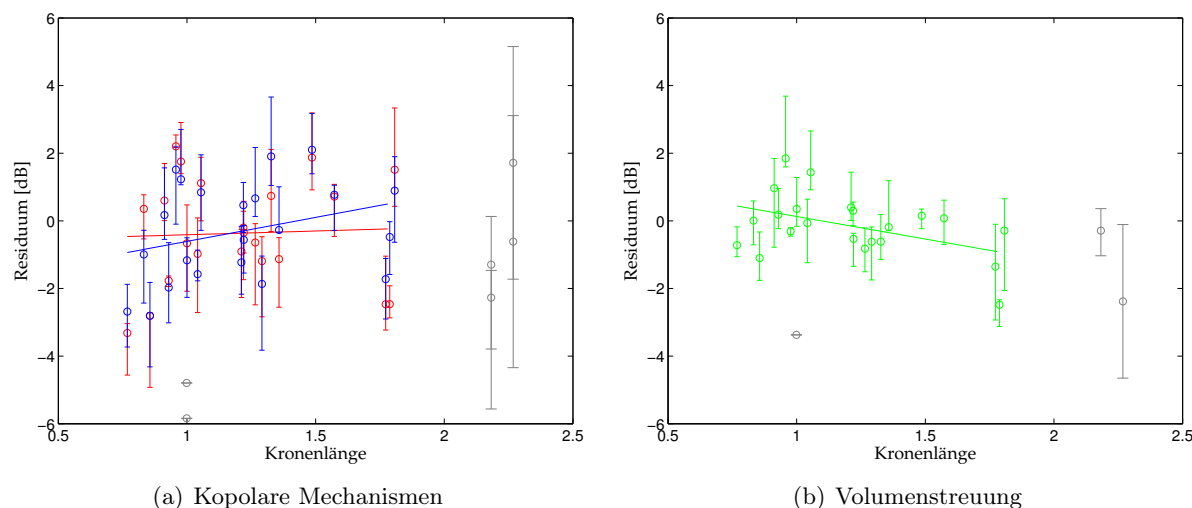


ABB. 3.31: Einfluss der Kronenlänge, rot: Zweifachreflexion, blau: Oberflächenstreuung, grün: Volumenstreuung, grau: ausgeschlossene Stichproben (mehr als 4 dB Streuung oder weniger als 3 Stichproben). Ein höherer Wert bedeutet eine kürzere Krone. Fluglinie 0103x1 und 0104x1, Testgebiet *Krycklan*.

Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte ist nur für ausgewählte Waldbestände verfügbar [Hajnsek 09]. Die kopolaren Mechanismen haben keine schlüssige Reaktion auf die veränderte Bodenfeuchte gezeigt. Die Volumenstreuung in ABB. 3.32 zeigt ebenso kein deutliches Bild. Für detailliertere Aussagen ist der Streuungsbereich der Bodenfeuchte im Testgebiet zu gering, nur zwei beprobte Bestände haben eine deutlich höhere Feuchtigkeit. In Anbetracht der Daten kann die Bodenfeuchte als relevanter Erklärungsparameter für die Residuen weder angenommen noch ausgeschlossen werden.

Schlussfolgerungen der Residuenanalyse

Abschliessend wurde die Residuenkorrektur analog zum Testgebiet Hinwil vorgenommen. Die Zweifachreflexion wurde mittels des Strukturparameters Kronenlänge korrigiert, die beiden anderen Streumechanismen mittels der Schichtung. Die Auswirkung auf den RMSE bezüglich Biomasseschätzung durch Inversion des ersten Modells aus einzelnen Streumechanismen wird in TAB. 3.20 dargestellt. Die Residuenkorrektur ist für alle Streumechanismen in der Lage, den

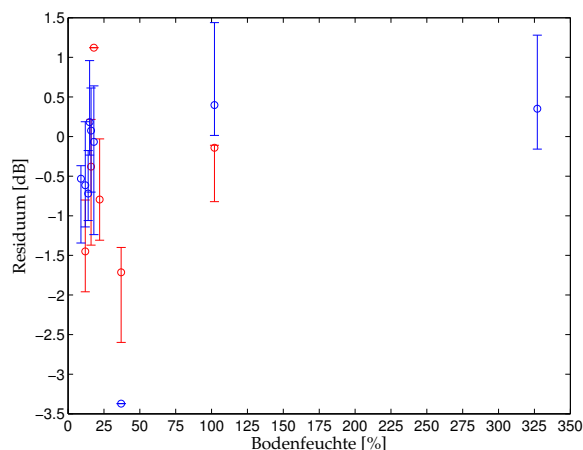


ABB. 3.32: Einfluss der Bodenfeuchte auf die Volumenstreuung, rot: Stichproben $< 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, blau: Stichproben $> 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Fluglinie 0103x1 und 0104x1, Testgebiet *Krycklan*.

mittleren Fehler erheblich zu reduzieren. Der verbleibende RMSE ist im Vergleich mit der Literatur [Le Toan 11] und dem Testgebiet Hinwil jedoch hoch.

	γ^0 od. σ^0		γ^0 od. σ^0 und St	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
		$[\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}]$		$[\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}]$
Volumenstreuung	0.24	657.28	0.31	319.79
Oberflächenstreuung	0.04	404475.95	0.11	2041.61
Zweifachreflexion	0.14	1211.67	0.15	983.42

TAB. 3.20: Korrektur der Residuen des 1. Modells durch Strukturparameter (St), Testgebiet *Krycklan*.

Die Modellparametrisierung zeigt in TAB. 3.21 nach der Residuenkorrektur eine erhöhte Korrelation zwischen Biomasse und Rückstreuung in allen Streumechanismen. Für die Volumenstreuung ist die Korrelation am höchsten und beträgt nach der Korrektur $R^2 = 0.31$. Auch das ist verglichen mit der Literatur [Le Toan 11] ein tiefer Wert.

3.7 Ausdünnung und Rückstreuung

Zwischen den beiden Testgebieten ist ein deutlicher Unterschied im Zusammenhang zwischen Biomasse und Rückstreuung festzustellen. Im folgenden Kapitel wird dargestellt, dass das abweichende Rückstreuverhalten durch Unterschiede der Ausdünnung (*thinning*) zum Teil erklärt werden

Modell 1	σ_{ref} [dB]	f	R^2
Kreuzpolare Streuung γ^0	-11.1	0.259	0.24
Kreuzpolare Streuung γ^0 und St	-11.0	0.310	0.31
Oberflächenstreuung γ^0	-5.4	0.114	0.04
Oberflächenstreuung γ^0 und St	-5.2	0.220	0.11
Zweifachreflexion σ^0	-8.9	0.301	0.14
Zweifachreflexion σ^0 und St	-8.5	0.315	0.15

TAB. 3.21: 1. Modell nach Residuenkorrektur durch Strukturparameter (St), Testgebiet *Krycklan*.

kann. Der Wert des Rückstreuparameters f , der einen Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse herstellt, wird aus der Wachstumsdynamik der Waldgebiete abgeleitet. Es wird gezeigt, dass nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Wachstumsdynamik der zu Grunde liegende Mechanismus, der zur Rückstreuung führt, für beide Testgebiete identisch ist – trotz der grossen festgestellten Abweichungen. Als Einführung in die relevanten Definitionen dient Kapitel 2.5.2.

Zu Beginn des Kapitels wird die simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes gezeigt, dies um eine Referenz dafür zu erhalten, wie sich die Rückstreuung ohne Ausdünnung verhalten müsste.

Anschliessend sind die Unterschiede der Ausdünnungsdynamik zwischen den beiden Testgebieten dargestellt und mit der gemessenen Rückstreuung in Beziehung gesetzt.

3.7.1 Einzelbaumrückstreuung

Die Einzelbaumrückstreuung r ist der grundlegende Parameter, von dem jegliche Schätzung des Zusammenhangs zwischen Biomasse und Rückstreuung abhängig ist. Daher wird in der Folge die Schätzung des Parameters r aus Simulationen und aus *SAR*-Messungen der beiden Testgebiete gezeigt.

Einzelbaumrückstreuung in der Simulation

In ABB. 3.33(a) - 3.33(c) wird die simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes in Abhängigkeit von seinem Alter gezeigt. Um direktionale Effekte abzumildern, wurde das Baummodell in 10° -Schritten rotiert. Die Bodeninteraktion wurde mit einer Rauigkeit von 0.3 m berücksichtigt, jedoch tritt in der Simulation keine direkte Streuung vom Boden auf. Quelle der hier gezeigten Rückstreuintensitäten ist nur das Baummodell. Um die Rechenzeit auf ein realistisches Mass zu beschränken, wird die Azimut-Fokussierte Näherung (vgl. KAPITEL 2.1.6) verwendet. In die Simulation fließt also die gesamte *chirp*-Bandbreite ein, das Rückstreuverhalten entlang der Azimut-Bandbreite wird aber als konstant angenommen.

In der Simulation wird deutlich, dass kleine Bäume durchaus der Rayleigh-Annahme der quadratischen Abhängigkeit der Rückstreuung vom Volumen genügen. Größere Baummodelle entsprechen deutlich nicht dieser Annahme, der Übergang erfolgt in der Simulation in allen Streumechanismen zwischen dem 16jährigen bis 17jährigen Baummodell. Wie in ABB. 3.33 sichtbar wird, beginnt der Bereich der Mie-Oszillationen beim Baumalter von 16 Jahren und wird geringer bis zum 24jährigen Baummodell. Diese Beobachtungen decken sich weitgehend mit den Überlegungen in [Brolly 12a]. Die Simulation wurde für verschiedene relative Permittivitätswerte (entspricht unterschiedlicher Holzfeuchtigkeit) durchgeführt. Der aus der Mittelung über alle Rotationen geschätzte Parameter r stimmt für verschiedene Leitfähigkeiten im Rahmen der Fehlerintervalle der Parameterschätzung überein. Wird eine individuelle Rotation betrachtet, so zeigt sich, dass die Abweichungen abhängig sind von der Leitfähigkeit. Dies kann mit dem allgemeinen Mie-Streutheorem erklärt werden. Die genaue Lage und die Werte der Oszillationen sind Abhängig von der Leitfähigkeit, aber nicht ihr Auftreten. Die Ausdehnung des Bereiches, in dem die Oszillationen auftreten, ändert sich kaum, wenn die Holzfeuchtigkeit geändert wird. Auch die Simulationen mit abweichender Feuchtigkeit konvergieren für höhere Einzelbaumbiomassen mit der hier gezeigten Simulation. Wird die Bodenrauigkeit reduziert, was stärkere Bodenreflexionen zur Folge hat, nähert sich der Verlauf der Zweifachreflexion dem der Oberflächenstreuung an. Das kann dadurch erklärt werden, dass Oberflächen-Streumechanismen bei stark spiegelndem Boden auch als Zweifachreflexion in Erscheinung treten.

Schlussfolgerung daraus ist, dass der Parameter r von Oberflächenstreuung und Volumestreuung von einem Testgebiet auf ein anderes übertragbar sein könnte, für die Zweifachreflexion dann, wenn die Reflektivität des Bodens vergleichbar ist. Den Parameter r für die Streueigenschaften, die direkt aus dem Vegetationsvolumen stammen, als Konstante zu betrachten ist auch

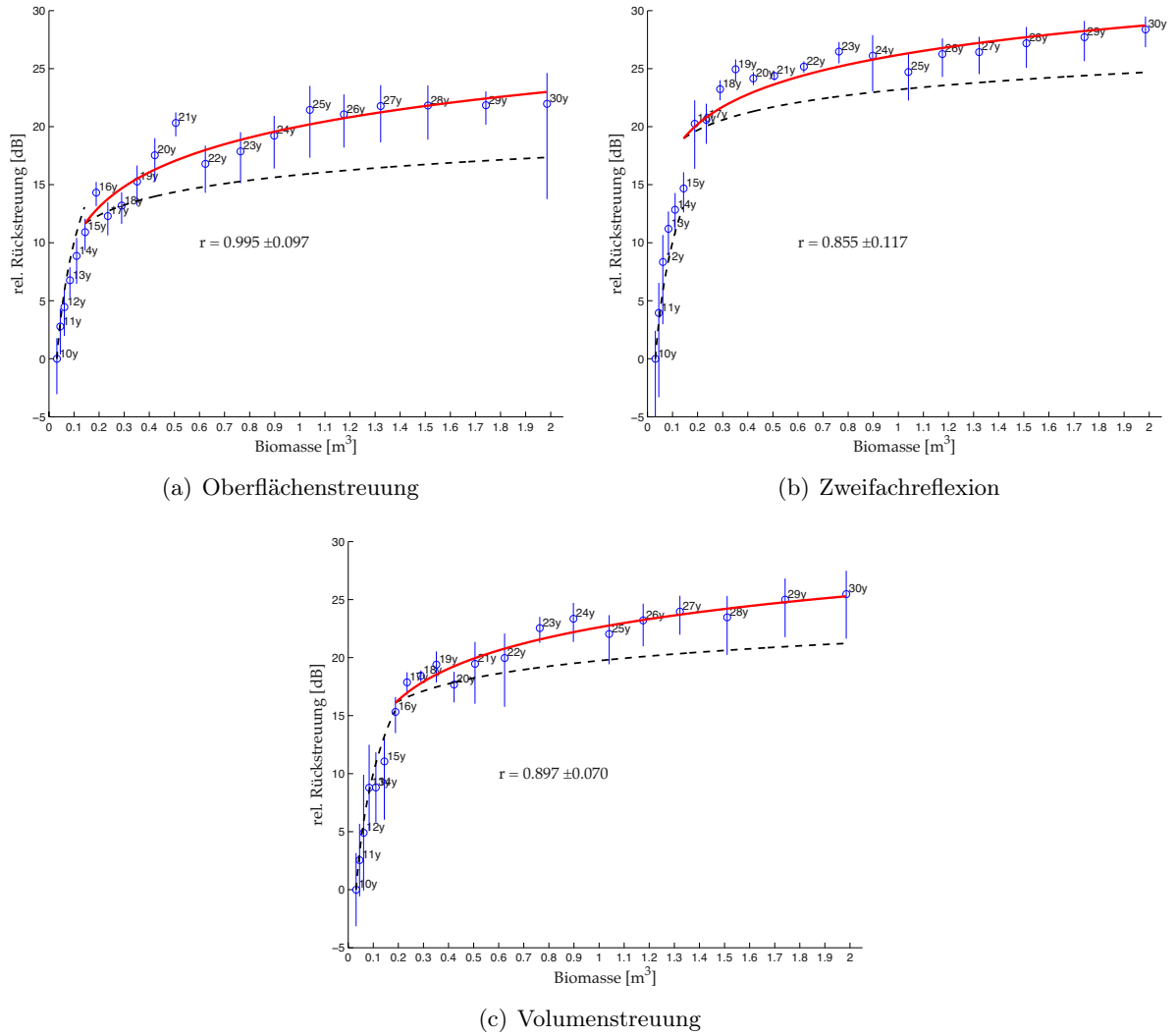


ABB. 3.33: Simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes in den drei Streumechanismen. Der Einzelbaum wurde in 10° -Schritten rotiert. Alle Werte relativ zur Biomasse und Rückstreuung des 10-jährigen Modellbaums. Die gestrichelten Graphen stehen für die Exponenten $r = 2$ und 0.5 , was der Rayleigh-Streuung bzw. der optischen Streuung entspricht. Der rote ausgezogene Graph entspricht der optimalen Anpassung des Modells ausserhalb der Rayleigh-Region.

aus theoretischen Überlegungen zum Streutheorem sinnvoll. Ein genügend grosser Streuer wird sich immer optisch verhalten, die Leitfähigkeit ändert daran nichts. Dasselbe gilt für sehr kleine Streuerdimensionen, die der Rayleigh-Approximation genügen. Die Region der Mie-Oszillationen kann durch die Leitfähigkeit beeinflusst werden, Lage und Stärke der Oszillationen ändern sich in der Simulation für veränderte Leitfähigkeiten. Durch die Mittelung verschiedener Rotationen verschwinden aber die Oszillationen weitgehend.

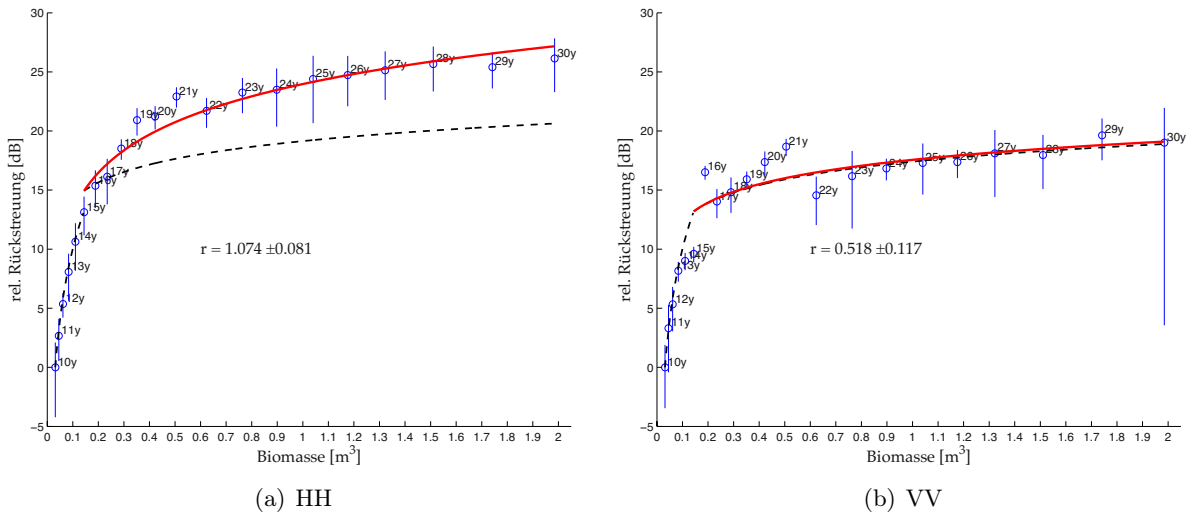


ABB. 3.34: Simulierte Rückstreuung eines Einzelbaumes in den zwei kopolaren Kanälen (der HV-Kanal ist in der relativen Darstellung identisch mit der bereits gezeigten Volumenstreuung). Der Einzelbaum wurde in 10° -Schritten rotiert. Alle Werte sind relativ zur Biomasse und Rückstreuung des 10-jährigen Modellbaums. Die gestrichelten Graphen stehen für die Exponenten $r = 2$ und 0.5 , was der Rayleigh-Streuung bzw. der optischen Streuung entspricht. Der rote ausgezogene Graph entspricht der optimalen Anpassung ausserhalb der Rayleigh-Region.

Festzuhalten ist weiter, dass der Exponent r für die Oberflächenstreuung grösser ist als der für die Volumenstreuung, die Zweifachreflexion zeigt in der Simulation den kleinsten Exponenten r . Die Grössenordnung der Exponenten für Einzelbäume ausserhalb der Rayleigh-Region bewegt sich im Intervall $[0.5 \dots 1]$. Die Rückstreuung der Einzelbäume ist also nicht rein optisch, ausser in der Zweifachreflexion, deren Rückstreuverhalten nahe bei der optischen Annahme liegt. Da sich Bäume immer aus einem Spektrum von Streuerdimensionen zusammensetzen, wäre ein rein optisches Verhalten für grössere Bäume in allen Streumechanismen überraschend. Wenn man davon ausgeht, dass die Zweifachreflexion von der Interaktion Boden-Stamm dominiert wird, kann das quasi-optische Verhalten erklärt werden. Stämme sind in ihrer Dimension gegenüber der Wellenlänge gross, die optische Annahme wird anwendbar. Die Darstellung der simulierten Reflexion in den einzelnen Kanälen in ABB. 3.34 unterstützt diese Interpretation. Die Rückstreuung im VV-Kanal zeigt tatsächlich ein optisches Verhalten für grössere Einzelbaumbiomassen.

In der Folge wird untersucht, ob der simulierte Parameter r mit dem aus den Daten der Testgebiete geschätzten übereinstimmt. Trifft dies zu, ist die Hypothese, dass die Einzelbaumrückstreuung r eine gebietsunabhängige «globale» Konstante ist, so weit haltbar, dass sie weiterführend untersucht werden könnte.

Testgebiet Hinwil

Der Parameter r kann unter Verwendung von (2.108) geschätzt werden, vorausgesetzt, die grundsätzliche Modellannahme ist haltbar. Zur Schätzung des r -Wertes wird, in Abweichung zu den meisten vorgenommenen Schätzungen, der Median der Stichproben verwendet, um den Einfluss der Ausreisser zu verkleinern. Weiter ist es sinnvoll, die Stichprobenauswahl anhand des Bedeckungsgrades vorzunehmen, da die Baumanzahl in die Schätzung einfließt und bei geringen Baumanzahlen die Auswirkung von Schätzfehlern grösser ist. Auch hier wird der Referenzdatensatz alleine untersucht, sowie die gemittelten Fluglinien in der RSL- und DLR-Prozessierung. Eine Übersicht über die Schätzung gibt TAB. 3.22 - TAB. 3.24. Deutlich wird auch hier der grosse absolute Fehler, der auf die grosse Streuung in den Daten zurückzuführen ist, sowie die nicht idealen R^2 - und χ_{red}^2 -Werte. Auch diese Werte sind auf eine grosse Streuung in den Daten zurückzuführen. Da das Modell nur über das Minimum von 2 Parametern verfügt, ist ein *overfit* auszuschliessen.

	r	R^2	χ_{red}^2
Bedeckung > 40 %, Referenztrack DLR	1.367 ± 0.317	0.594	0.083
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> DLR	1.222 ± 0.285	0.593	0.109
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> RSL	1.157 ± 0.215	0.696	0.480

TAB. 3.22: Schätzung des Parameters r , Oberflächenstreuung, Testgebiet *Hinwil*.

	r	R^2	χ_{red}^2
Bedeckung > 40 %, Referenztrack DLR	0.648 ± 0.483	0.220	0.672
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> DLR	0.794 ± 0.365	0.323	0.635
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> RSL	0.869 ± 0.272	0.471	2.895

TAB. 3.23: Schätzung des Parameters r , Zweifachreflexion, Testgebiet *Hinwil*.

Die Schätzung des Parameters r direkt aus Daten deckt sich (mit Berücksichtigung der Standardfehler der geschätzten Parameter) für die Volumenstreuung sehr gut mit dem simulierten Wert. Für die Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion werden im Vergleich zur Simulation höhere Werte geschätzt. Die Simulationsergebnisse liegen aber im geschätzten Fehlerintervall.

	r	R^2	χ^2_{red}
Bedeckung > 40 %, Referenztrack DLR	1.008 ± 0.274	0.243	1.347
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> DLR	0.799 ± 0.279	0.001	2.821
Bedeckung > 40 %, alle <i>tracks</i> RSL	0.877 ± 0.232	0.130	7.938

TAB. 3.24: Schätzung des Parameters r , Kreuzpolare Rückstreuung, Testgebiet *Hinwil*.

Werden mehrere Fluglinien gemittelt, zeigen die nicht-koregistrierten Daten wiederum einen der einzelnen Fluglinie näherliegenden Wert als die koregistrierten Daten.

Bis hierhin kann festgehalten werden, dass die Simulation und die *SAR*-Messungen insofern vergleichbar sind, dass die Wertebereiche unter Berücksichtigung des Standardfehlers übereinstimmen.

Testgebiet Krycklan

In ABB. 3.35 ist die Schätzung des Parameters r für Waldstandorte mit Biomasse $\geq 100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ zusammengefasst. Numerisch erscheint in den Schätzungen des r -Wertes für die Volumenstreuung der oben gefundene typische Wert von $r_{HV+VH} = 0.9$ auch in diesem Testgebiet plausibel. Die Werte stimmen wieder im Rahmen der Fehlerintervalle mit den im Testgebiet aus den Daten geschätzten r -Werten überein.

Die Zweifachreflexion entspricht deutlich nicht den aus der Simulation erhaltenen Werten, während die beiden anderen Mechanismen in guter Übereinstimmung mit den simulierten Daten sind. Hier zeigt sich eine Unsicherheit bezüglich der Konstanz der Einzelbaumrückstreuung. Es ist anzunehmen, dass die Einzelbaumrückstreuung für die Zweifachreflexion auch höhere Werte annehmen kann. Erklärbar ist das mit der grösseren Häufigkeit kleiner Bäume im Testgebiet Krycklan, die von ihrem Volumen her noch in der Rayleigh-Region liegen können. Die Simulation zeigt für die Zweifachreflexion eine sprunghafte Veränderung zwischen Rayleigh-Region und der anschliessenden Mie-Region. Sind also häufig Einzelbäume mit einem Volumen vorhanden, das in der kritischen Übergangsregion liegt, sind im Mittel auch höhere Werte für die Einzelbaumrückstreuung r zu erwarten. Das Testgebiet Krycklan t02 zeigt solche höheren Werte. Weiter wird auch deutlich, dass die Oberflächenstreuung höhere Werte annimmt als die Zweifachreflexion.

Wie ABB. 3.36, zeigt, ist die vermutete Rayleigh-Streuung kleinerer Bäume nicht haltbar oder die Schätzung des r -Wertes ist für die Standorte mit geringer Biomasse aus nicht geklärten

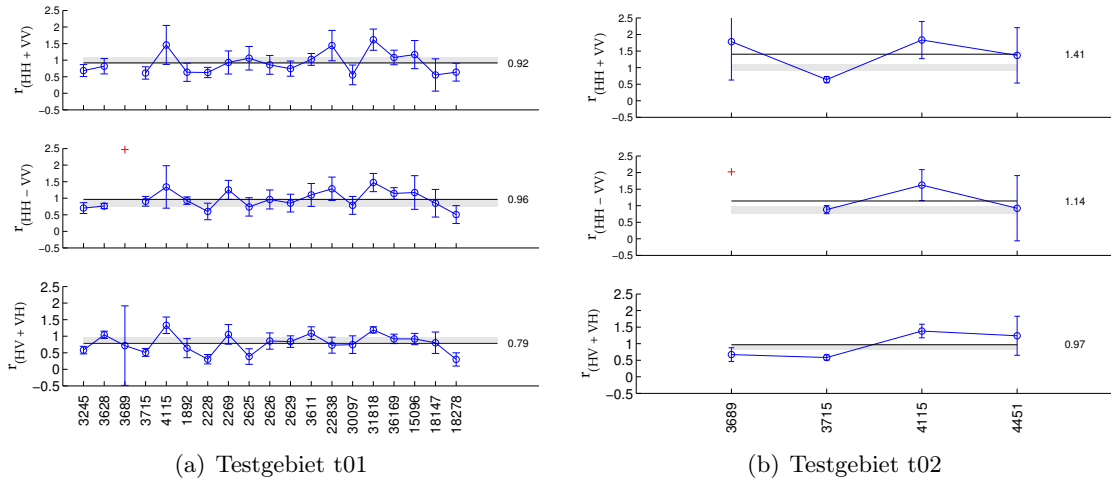


ABB. 3.35: Schätzung des r -Wertes, Waldstandorte mit Biomasse $\geq 150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, Testgebiet *Krycklan*. Grau hinterlegt ist das aus der Simulation bestimmte Parameterintervall.

Gründen nicht verlässlich möglich. Das hier vorliegende Resultat zeigt durchwegs tiefere r -Werte für Bestände mit Biomasse $< 150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$.

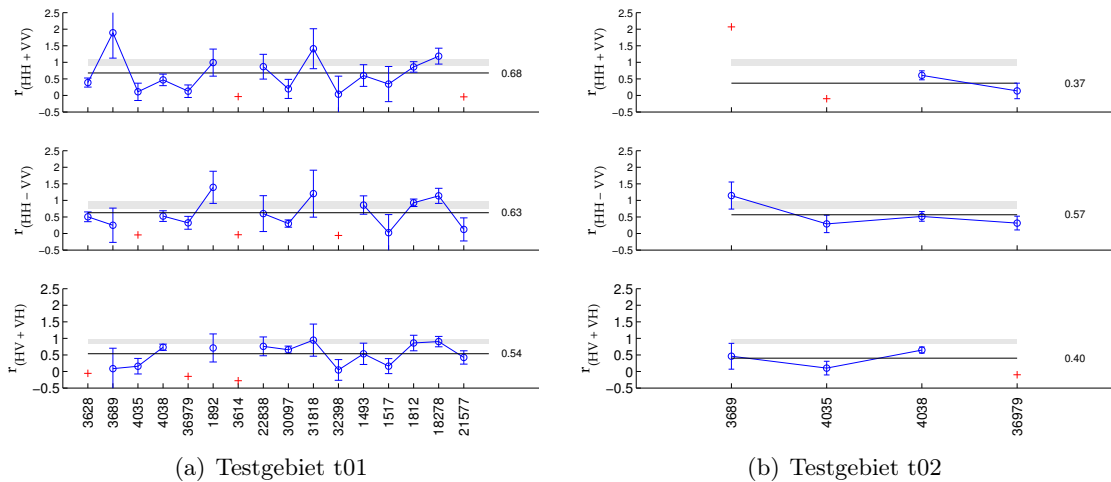


ABB. 3.36: Schätzung des r -Wertes, Waldstandorte mit Biomasse $< 150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, Testgebiet *Krycklan*. Grau hinterlegt ist das aus der Simulation bestimmte Parameterintervall.

Schlussfolgerungen

Als Schlussfolgerung können folgende Hypothesen aufgestellt werden:

1. Für die Volumenstreuung ist die Einzelbaumrückstreuung r prinzipiell mit einer geringen Schwankung auf andere Testgebiete übertragbar. Der typische Wert bewegt sich im In-

tervall $[0.83 \dots 0.97]$. Die Unsicherheit (Standardfehler) ist eine Folge der Streuung in den simulierten Daten und den *SAR*-Messungen in den beiden Testgebieten.

2. Für die Oberflächenstreuung liegt der r -Wert höher als in den anderen Mechanismen. Der Wert liegt nahe bei 1.
3. Die Zweifachreflexion zeigt in Wäldern mit kleinvolumigen Bäumen ähnlich hohe Werte wie die Oberflächenstreuung. Für grossvolumige Bäume wie im Testgebiet Hinwil liegt der Wert tiefer. Auch in der Simulation zeigt sich ein grosses Fehlerintervall. Der Wert liegt typischerweise im Intervall $[0.75 \dots 0.97]$. Aus der Simulation wurde auch deutlich, dass die Zweifachreflexion stark abhängig ist von der Reflektivität des Bodens, was zum grossen geschätzten Werteintervall führt.
4. Der Vergleich der beiden Testgebiete zeigt, dass der festgestellte Unterschied in der Korrelation zwischen Rückstreuung und Biomasse nicht auf kleinere Einzelbaumreflexionswerte zurückgeführt werden kann.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die gemessenen Korrelationsunterschiede auf das Zusammenwirken von Einzelbaumrückstreuung und Ausdünnungsdynamik zurückzuführen sind.

3.7.2 Ausdünnung in den Testgebieten

Testgebiet Hinwil

Das Testgebiet Hinwil umfasst ein kleines Waldgebiet (ca. 70 ha). Für die Homogenität der Waldstruktur sprechen die untersuchten Forstinventurdaten, die vernachlässigbare Topographie und die Kleinräumigkeit des Gebietes. In der Folge wird angenommen, dass die Ausdünnungsdynamik (der Ausdünnungskoeffizient d) im Testgebiet konstant ist. Eine grobe Sichtung der Inventurdaten und der gemessenen Rückstreuung zeigt ein Ausdünnungsverhalten, das durch den Parameter $d < 1$ beschrieben werden kann (siehe KAPITEL 2.5.2). Stichproben mit grösserer Biomasse werden durch grössere Bäume gebildet.

Schätzung der Ausdünnung aus Forstinventardaten

Aus den Kantonalen Forstinventardaten [Bau09] kann direkt der mittlere Abstand eines Baumes zu seinen nächsten Nachbarn ermittelt werden, da die Einzelbaumkoordinaten erfasst worden sind. Diese Messgrösse ist nicht gleichbedeutend mit der Baumanzahl in einer Stichprobe, da ein direkter Zusammenhang zwischen Einzelbaumbiomasse und Abstand hergestellt werden kann, was über die Baumanzahl nur indirekt und für eine mittlere Einzelbaumbiomasse möglich ist. In ABB. 3.37 ist dieser mittlere Nachbarschaftsabstand in Abhängigkeit von der Biomasse des Einzelbaumes gezeigt.

Der Einzelbaumabstand a entspricht unter Verwendung relativer Grössen folgendem Ausdruck:

$$N \propto (\delta b)^{-d} \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{a^2} \propto N \quad (3.6)$$

$$a \propto (\delta b)^{\frac{d}{2}} \quad (3.7)$$

Der Ausdünnungskoeffizient d entspricht dem in (2.109) verwendeten Exponenten und beschreibt die Ausdünnung bei zunehmender Biomasse der Einzelbäume. In Hinwil wurde $d = 0.696$ geschätzt. Aus der Grafik wird deutlich, dass die Bäume mit geringen Volumen von der Regressionskurve abweichen. Das kann damit erklärt werden, dass für kleine Bäume mit geringem Ressourcenbedarf die Ausdünnung schwächer ausfällt.

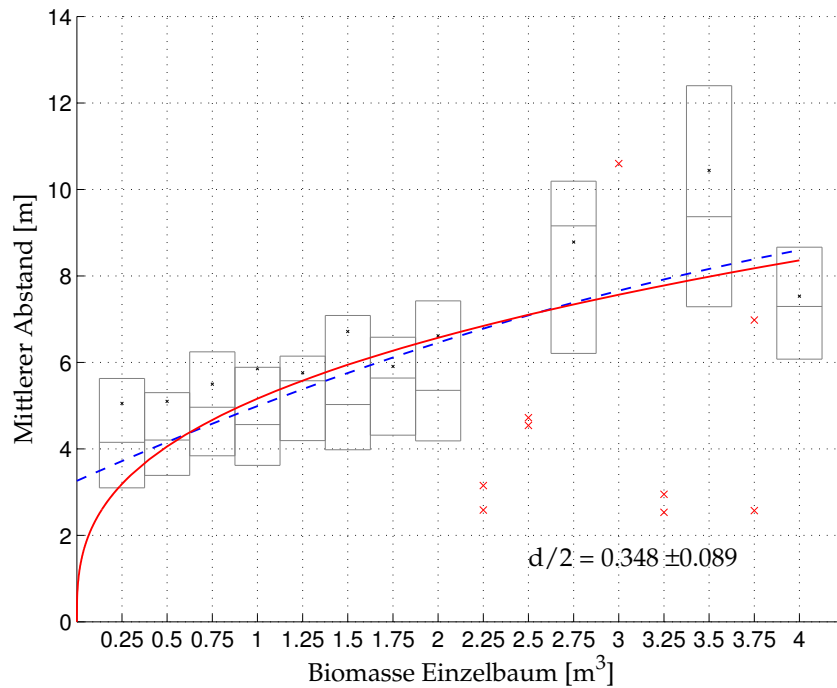


ABB. 3.37: Mittlerer Abstand zwischen Einzelbäumen in Abhängigkeit der Biomasse, Testgebiet *Hinwil*. Rot: beste Anpassung gemäss (3.7), blau gestrichelt: Regression 2. Grad.

Schätzung mittels *thinning detector*

Der in KAPITEL 2.5.2 beschriebene iterative *thinning detector* schätzt für die Stichproben mit Bedeckung $> 40\%$ einen Wert von $d = 0.69$, was mit der Schätzung aus Baumpositionen übereinstimmt. Die Ausgabe des *thinning detector* wird in ABB. 3.38 dargestellt.

Schlussfolgerungen Testgebiet *Hinwil*

Die gefundenen Ausdünnungsparameter werden mit der gemessenen Rückstreuung in Beziehung gesetzt. Ausgehend von der Formulierung (2.120) wird aus der simulierten oder aus der Messung geschätzten Einzelbaumrückstreuung r der Rückstreuparameter f geschätzt und mit der Messung verglichen. Als Referenz dient der f -Wert nach Korrektur der Residuen.

In TAB. 3.25 werden die Werte der Einzelbaumrückstreuung aus Simulation und Schätzung aus Daten einander gegenübergestellt. Die geschätzten r -Werte entsprechen den Mittelwerten der in TAB. 3.24 – TAB. 3.23 gezeigten Werte. In TAB. 3.26 wird aus diesen Werten der Rückstreuparameter f berechnet und der direkten Messung gegenübergestellt.

Die Resultate für das Testgebiet *Hinwil* lassen den Schluss zu, dass die Ausdünnung die gemessene Rückstreuung in den drei Streumechanismen gemäss der aufgestellten Modellannahme

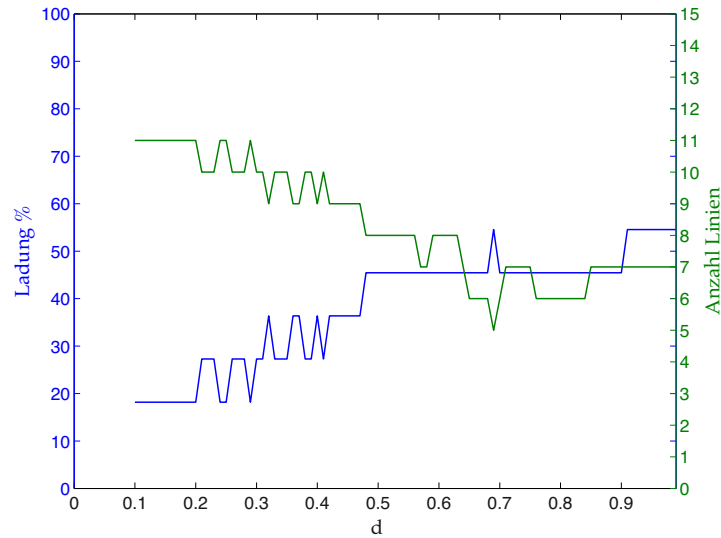


ABB. 3.38: Iterativer *thinning detector*, Testgebiet *Hinwil*. Der gefundene Wert beträgt $d = 0.69$.

	Simulation	Schätzung
Oberflächenstreuung	0.99 ± 0.10	1.25 ± 0.16
Zweifachreflexion	0.85 ± 0.12	0.77 ± 0.22
Volumenstreuung	0.90 ± 0.07	0.89 ± 0.15

TAB. 3.25: Schätzung der Einzelbaumreflexion r , Testgebiet *Hinwil*.

	r aus Simulation	r aus Schätzung	f aus Messung
Oberflächenstreuung	0.98 ± 0.26	1.82 ± 0.29	0.98
Zweifachreflexion	0.52 ± 0.26	0.25 ± 0.26	0.31
Volumenstreuung	0.66 ± 0.26	0.65 ± 0.26	0.64

TAB. 3.26: Schätzung des Rückstreuparameters f aus simuliertem r -Wert und aus der Messung geschätztem r -Wert, Testgebiet *Hinwil*. Als Messwert für f gilt der Wert des 1. Modells nach der Residuenkorrektur, vgl. KAPITEL 3.6.

beeinflusst. Der Ausdünnungskoeffizient d , der mit mehreren unabhängigen Methoden mit deutlicher Übereinstimmung auf $d = 0.7$ geschätzt wurde, führt zusammen mit einem als für einen Streumechanismus konstant angesehenen Wert r zur gemessenen Rückstreuung, ausgedrückt im Parameter f .

Für die Volumenstreuung wird die beste Übereinstimmung der verschiedenen Schätzverfahren festgestellt. Zusammen mit dem Ausdünnungsparameter $d = 0.69$ führen sowohl simulierter r -Wert ($f = 0.66$) als auch aus Daten geschätzter r -Wert ($f = 0.65$) zu Werten für den Rückstreuparameter f , die mit der Messung $f = 0.64$ weitgehend übereinstimmen.

Für die Oberflächenstreuung führt der simulierte Wert zu einem übereinstimmenden Wert für f . Der f -Wert der Zweifachreflexion wird mit dem aus den Daten geschätzten r -Wert besser beschrieben.

Die grossen Fehler der berechneten Parameter lassen sich mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz erklären. Da in der Berechnung aller Parameter Differenzen zwischen Werten in einem ähnlichen Wertebereich auftreten, werden die Fehler rasch sehr gross. Dies besonders im Fall der Zweifachreflexion, wo der geschätzte Wert der Einzelbaumrückstreuung r und Ausdünnungsparameter d nahe beieinander liegen.

Die Ausdünnung dient durchaus zu einer numerischen Beschreibung der gemessenen Rückstreuung. Eine weitere Schlussfolgerung ist, dass die Rückstreuungsänderung auf Grund der wachsenden Baumbiomasse mit einem Exponenten r beschrieben werden kann, dessen typische Werte eine hohe Korrelation erwarten lassen. Dennoch führt die Ausdünnung, beschrieben durch den Parameter d , zu einer tieferen Korrelation zwischen Biomasse und Rückstreuung als erwartet, ausgedrückt im Rückstreuparameter f .

Testgebiet Krycklan

Das Rückstreuverhalten des Testgebietes Krycklan unterscheidet sich erheblich von dem des Testgebietes Hinwil, vgl. KAPITEL 3.5. Ausserdem unterscheidet sich die Rückstreuung auch zwischen einzelnen Waldbeständen im Testgebiet. Im folgenden Teil wird dargestellt, dass die festgestellte geringe Sensitivität der Rückstreuung bezüglich Biomasse auf die Ausdünnung zurückgeführt werden kann. Weiter wird gezeigt, dass die Streuung in den Daten des Testgebietes Krycklan durch Unterschiede im Ausdünnungsverhalten erklärt werden kann.

Grundannahmen

Die hohe Sättigung der Rückstreuung lässt auf einen hohen Ausdünnungsparameter d schliessen. Daher wird in einem ersten Schritt überprüft, ob der Wertebereich des Parameter d auf das Intervall $[0 \dots 1]$ eingeschränkt werden kann. In ABB. 3.39 wird die Einzelbaumbiomasse in Abhängigkeit der Gesamtbiomasse der Stichproben gezeigt. Es wird deutlich, dass diese Annahme

haltbar ist. Das Wachstumsverhalten zeigt einen «normalen» Verlauf in dem Sinn, dass höhere Biomassen durch voluminösere Einzelbäume gebildet werden.

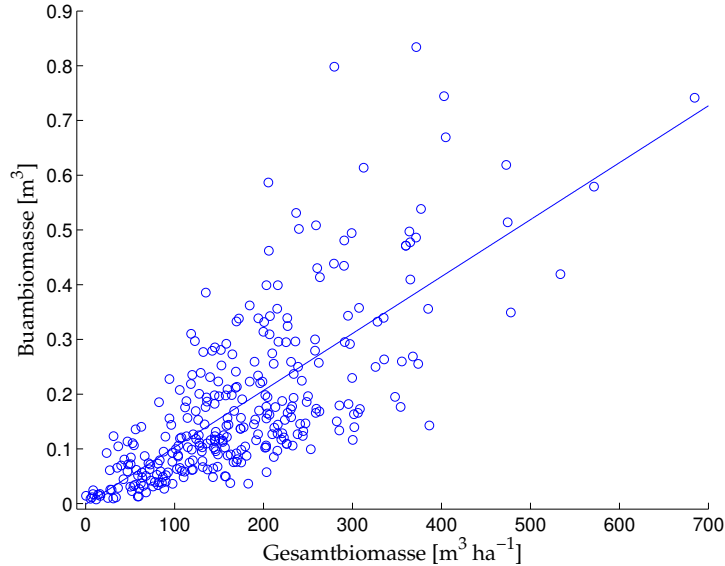


ABB. 3.39: Gesamtbiomasse pro Fläche und Einzelbaumbiomasse, Testgebiet *Krycklan*. Da hohe Gesamtbiomassewerte durch Bäume höherer Biomasse erreicht werden, kann der Parameter d auf $[0 \dots 1]$ eingeschränkt werden.

ABB. 3.21 zeigt, dass der Zusammenhang zwischen *plots* mit tiefer Biomasse und Rückstreuung deutlicher sichtbar ist und sich erst mit höheren Biomassewerten reduziert. Dies im Unterschied zum Testgebiet Hinwil, wo der Rückstreuparameter f auch für tiefere Biomassen noch im Rahmen der Standardfehler als gültig angesehen werden kann. Die ABB. 3.40 zeigt, dass sich die Einzelbaumbiomassen zwischen den Testgebieten stark unterscheiden. Im borealen Nadelwald im Testgebiet Krycklan sind Bäume mit geringem Volumen häufiger vertreten. Da in der Rückstreuungs-Simulation in ABB. 3.33(c) ersichtlich wird, dass Bäume mit geringer Biomasse (die geschätzte Grenze liegt bei 0.15 m^3) eine quadratische Abhängigkeit zwischen Volumen und Rückstreuung aufweisen. Die Anzahl der Bäume mit Einzelbaumbiomasse $b < 0.15 \text{ m}^3$ macht im Testgebiet weniger als 10% aller Bäume aus, im Testgebiet Krycklan allerdings rund 75%. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass im Testgebiet Krycklan die Kluppschwelle bei 4 cm angesetzt wurde, in Hinwil aber bei 12 cm. Dennoch ist die Feststellung gültig, dass im Testgebiet Krycklan kleinere Einzelbaumbiomassen häufiger sind als in Hinwil. Die festgestellte Sättigung in Krycklan bei höherer Biomasse kann also auch zum Teil ohne *thinning* mit einer Änderung des Rückstreuverhaltens erklärt werden.

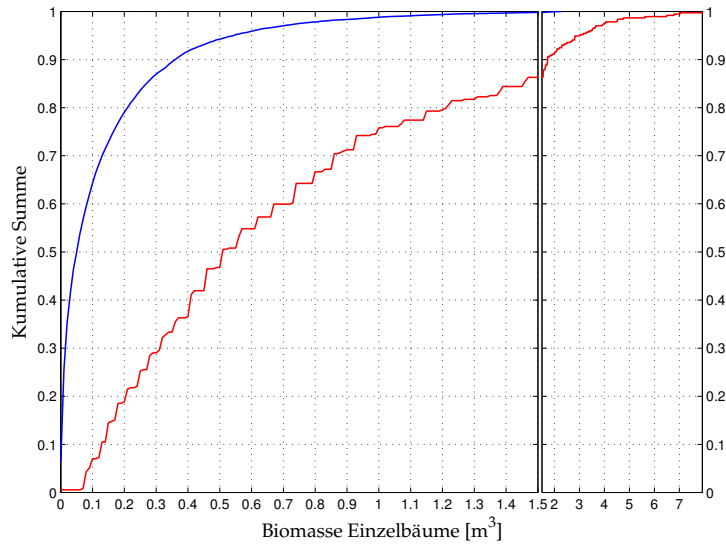


ABB. 3.40: Kumulative Summe der Einzelbaumbiomassen, die Stichprobenkreise haben in beiden Testgebieten einen Radius von 10 m. Rot: Testgebiet *Hinwil*, 42 Stichproben, blau: Testgebiet *Krycklan*, 310 Stichproben.

Die ABB. 3.41 stützt diese Erklärung, die Mehrheit der Einzelbaumbiomassen der Stichproben mit einer Biomasse kleiner als $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ liegen tiefer als 0.1 m^3 . Allerdings widerspricht die Feststellung, dass der geschätzte r -Wert für Stichproben mit geringer Biomasse tiefer liegt als für höhere Biomassen, dieser Interpretation. Dennoch ist es vernünftig, in der Folge die Stichproben, deren Einzelbaumbiomasse deutlich unter der angenommenen Grenze zwischen Rayleigh- und Mie-Region liegt, gesondert zu betrachten.

Schätzung der Ausdünnung

Für die Schätzung der Ausdünnung stellt sich die Frage, ob (a) die Bestände eine räumliche Einheit darstellen oder ob (b) alle Stichproben gemeinsam betrachtet werden, also keine Vorkenntnisse über die Waldstruktur mit einfließen. In der Folge werden beide Herangehensweisen verfolgt.

Durch den iterativen *thinning detector*-Algorithmus wird der Ausdünnungsparameter geschätzt. Für (a) erfolgt die Schätzung für die einzelnen Waldbestände; für (b) erfolgt die Schätzung für die nach Biomasse klassierten Stichproben. Die Ausgabe des Algorithmus ist exemplarisch für alle Bestände mit einer Biomasse $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in ABB. 3.42 gezeigt.

Die Schätzung des Ausdünnungsparameters in den einzelnen Beständen ist in ABB. 3.43 gezeigt. Sichtbar wird eine grosse Streuung der geschätzten Ausdünnungsparameter. In TAB. 3.27

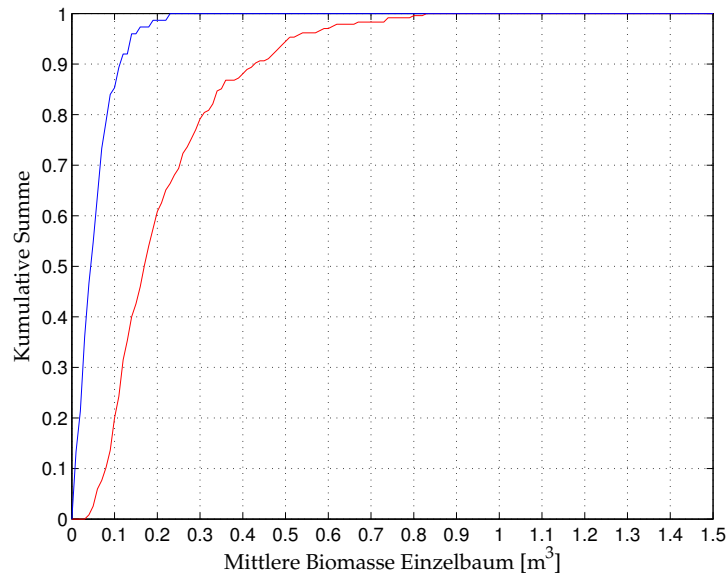


ABB. 3.41: Kumulative Summe der Einzelbaumbiomassen, Testgebiet *Krycklan*. Rot: Biomasse der Stichprobe (*plot*) grösser als $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, blau: kleiner als $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

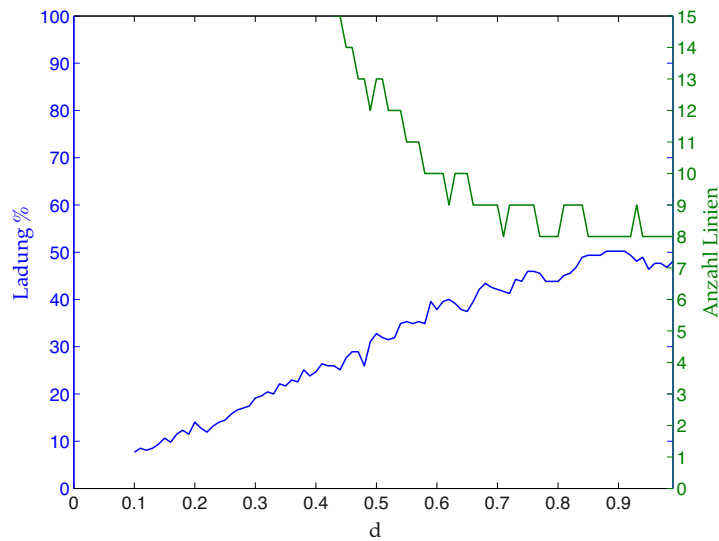


ABB. 3.42: Schätzung des d -Wertes, alle Stichproben mit $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, Testgebiet *Krycklan*.

sind die Resultate der Schätzung für einzelne Bestände sowie für die zusammengefassten Stichproben gezeigt. Die Schätzung des d -Wertes aus den einzelnen Beständen ist teilweise auf Grund der wenigen verfügbaren Stichproben nicht eindeutig möglich. In diesen Fällen wird das erwartete Intervall des Parameters d gezeigt.

Deutlich wird trotz Streuung, dass der Wert des Parameters d in beiden Herangehensweisen hoch liegt, typischerweise $d \sim 0.9$. Dieser Wert liegt nahe bei den Einzelbaumrückstreuungen r für

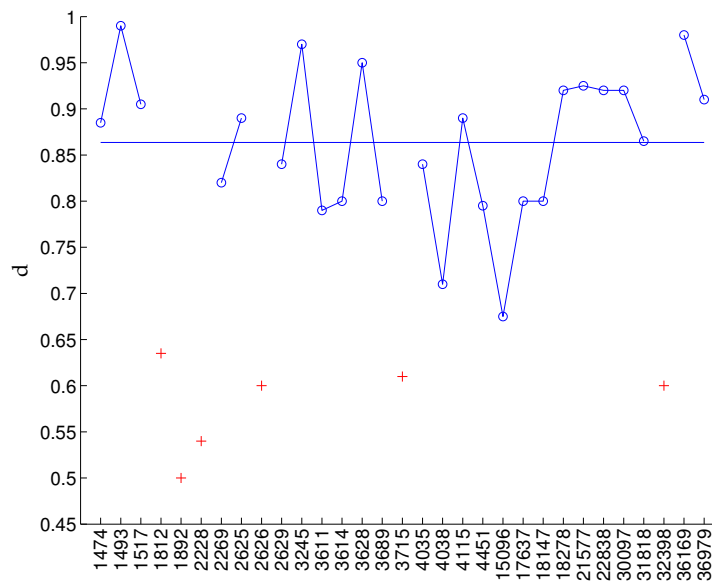


ABB. 3.43: Schätzung des Ausdünnungsparameters, alle Waldstandorte, Testgebiet *Krycklan*.

alle Mechanismen. Es ist daher zu erwarten, dass die festgestellte Korrelation zwischen Rückstreuung und Biomasse tiefer liegt als im Testgebiet Hinwil. Die Aufgabe der Bestandeszugehörigkeit und Klassierung in Biomasseklassen zeigt weiter, dass die Ausdünnung mit steigender Biomasse zunimmt. Dies bestätigt die Modellparametrisierung des 2. Modells, worin ein negativer Wert des Parameters c geschätzt wird, was einer Zunahme der Ausdünnung mit zunehmender Biomasse entspricht. Dies erklärt ursächlich die Feststellung, dass die Korrelation zwischen Rückstreuung und Biomasse vor allem durch die Stichproben mit tiefer Biomasse aufrecht erhalten wird.

Es wurde versucht, die Streuung in ABB. 3.43 mit biophysikalischen Parametern in Beziehung zu setzen. In Betracht gezogen wurde die Meereshöhe des Waldbestandes, die Steilheit und die Exposition. Die Motivation für diese Untersuchung liegt in der Überlegung, dass günstige Standortbedingungen zu einer schwächeren Ausdünnung führen könnten. Die untersuchten Einflussfaktoren zeigen keinen signifikanten Einfluss auf den Ausdünnungsparameter d . Es konnte festgestellt werden, dass die tiefen Werte für den Ausdünnungsparameter d im Testgebiet Krycklan nur bei Südexposition auftreten, allerdings treten für Hänge mit Südexposition auch sehr hohe Ausdünnungsparameter d auf.

Die starken Unterschiede in den Ausdünnungsparametern müssten zu einer starken Streuung der Rückstreuwerte insbesondere für höhere Biomasse führen. Es wurde erfolglos versucht, die Ausdünnungsparameter d in Beziehung zu setzen mit den Rückstreuparametern f .

Bestand	d
1474	[0.78, 0.99]
1493	0.99
1517	[0.84, 0.97]
1812	[0.37, 0.90]
1892	0.50
2228	0.54
2269	0.82
2625	0.89
2626	0.60
2629	0.84
3245	0.97
3611	[0.68, 0.90]
3614	[0.61, 0.99]
3628	0.95
3689	0.80
3715	[0.23, 0.99]
4035	0.84
4038	0.71
4115	0.89
4451	[0.60, 0.99]
15096	[0.57, 0.78]
17637	0.80
18147	0.80
18278	0.92
21577	[0.86, 0.99]
22838	0.92
30097	0.92
31818	[0.74, 0.99]
32398	0.60
36169	0.98
36979	0.91
Median	0.84
Alle <i>stands</i>	0.76
<i>stands</i> $0 - 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	0.77
<i>stands</i> $B > 75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	0.98
<i>stands</i> $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	0.88
<i>stands</i> $B > 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	0.93

TAB. 3.27: Geschätzte Ausdünnungsparameter, Testgebiet *Krycklan*. Die Anzahl Ausdünnungslinien bezieht sich auf die benötigte Anzahl Linien, um 68% der Stichproben abzudecken.

Wenn das erste Modell aber für alle Bestände mit hohen bzw. tiefen Ausdünnungswerten individuell parametrisiert wird, folgt eine deutliche Reduktion des erwarteten Fehlers, was in TAB. 3.28 gezeigt wird. Der erwartete Fehler bezüglich des ersten Modells nach Residuenkorrektur durch Strukturparametern und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausdünnungs-

dynamik liegt immer noch deutlich über den erwarteten 25% der Gesamtbiomasse, reduziert sich aber gegenüber der anfänglichen Modellparametrisierung in allen Streumechanismen erheblich. Dies bedeutet, dass die unterschiedliche Ausdünnungsdynamik im Testgebiet für einen Teil der Streuung verantwortlich ist.

	γ^0 und St		γ^0 und St, $d > 0.75$		γ^0 und St, $d < 0.75$	
	R^2	RMSE [m ³ ha ⁻¹]	R^2	RMSE [m ³ ha ⁻¹]	R^2	RMSE [m ³ ha ⁻¹]
Volumenstreuung	0.31	343.87	0.36	240.95	0.18	562.71
Oberflächenstreuung	0.11	2041.61	0.09	2573.76	0.19	545.84
Zweifachreflexion	0.15	983.42	0.14	1068.28	0.17	652.81

TAB. 3.28: Abhängigkeit der Residuen bezüglich des durch Strukturparameter (St) korrigierten 1. Modells vom Ausdünnungsparameter d , Testgebiet *Krycklan*.

Schlussfolgerungen Testgebiet Krycklan

Die Frage bleibt offen, weshalb überhaupt eine Korrelation beobachtet wird, wenn die Werte für den Ausdünnungsparameter d so nahe bei der angenommenen Einzelbaumrückstreuung r liegt. In ABB. 3.44 wird der Rückstreuparameter f in Abhängigkeit von r und d gezeigt. Es wird rasch deutlich, dass in Situationen, in denen die Werte des Ausdünnungskoeffizienten d nahe bei der Einzelbaumrückstreuung r liegen, kleine Änderungen grosse Auswirkungen für den Rückstreuparameter f haben. Wenn die Berechnungen für den im Testgebiet Krycklan beobachteten Rückstreuparameter f mit den gefundenen Werten für d analog zum Testgebiet Hinwil durchgeführt werden, zeigt sich diese Problematik deutlich. Im Gegensatz zum Testgebiet Hinwil, wo d und r einen weiten Abstand aufweisen, ist die Schätzung des Parameters f aus Einzelbaumrückstreuung r und Ausdünnung d im Testgebiet Krycklan nicht erfolgversprechend. Die geschätzten Ausdünnungsparameterwerte, die um den Wert $d \sim 0.9$ liegen, lassen erwarten, dass die Volumenstreuung einen deutlich negativen Wert f aufweist, während die Zweifachreflexion entweder ebenfalls einen negativen Verlauf zeigt oder dann einen konstanten. Die Oberfläche mit der grössten Einzelbaumreflexion r sollte einen positiven Verlauf zeigen. Die Messung widerlegt diese Erwartung vorerst. Für die Zweifachreflexion wird der höchste Wert für f geschätzt, gefolgt von der Volumenstreuung. Die Oberflächenstreuung zeigt einen deutlich kleineren Wert.

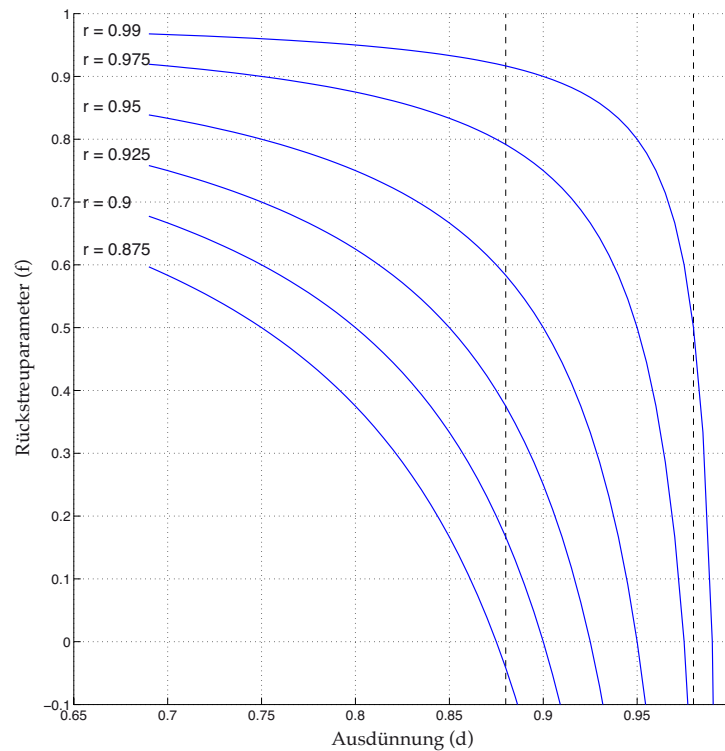


ABB. 3.44: Werte des Rückstreuparameters f in Abhängigkeit der Einzelbaumrückstreuung r und Ausdünnungsparameter d . Der geschätzte Bereich des Ausdünnungsparameters d für das Testgebiet Krycklan ist durch die durchbrochenen vertikalen Linien angedeutet.

Der *thinning detector* erlaubt auch die Unterscheidung von verschiedenen Ausdünnungslinien für einen bestimmten Ausdünnungswert d . Wird dies für die Stichproben mit $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ im Testgebiet Krycklan für den Wert $d = 0.88$ durchgeführt, folgt die in ABB. 3.45 gezeigte Aufschlüsselung der Einzelstichproben, die die Abweichung der erwarteten Werte von den gemessenen erklären kann.

Die Aufschlüsselung in Ausdünnungslinien bestätigt die bereits im Theorieteil beschriebene Annahme, dass für Verläufe der Ausdünnungslinien, die nahezu horizontal verlaufen, die aus den Daten geschätzte Korrelation (Parameter f) eine Folge der unterschiedlichen Startbedingungen der Ausdünnungslinien ist und nicht eine Folge der Reflektivitätszunahme auf Grund höherer Biomasse. Die ABB. 3.45 zeigt wie erwartet deutlich positive Steigungen für die Ausdünnungslinien der Oberflächenstreuung, flachere für die Zweifachreflexion und mehrheitlich konstante oder negative Steigungen für die Volumenstreuung. Dennoch resultieren aus der Gesamtheit der Ausdünnungslinien die z.B. in TAB. 3.21 gezeigten Werte für den Rückstreuparameter f .

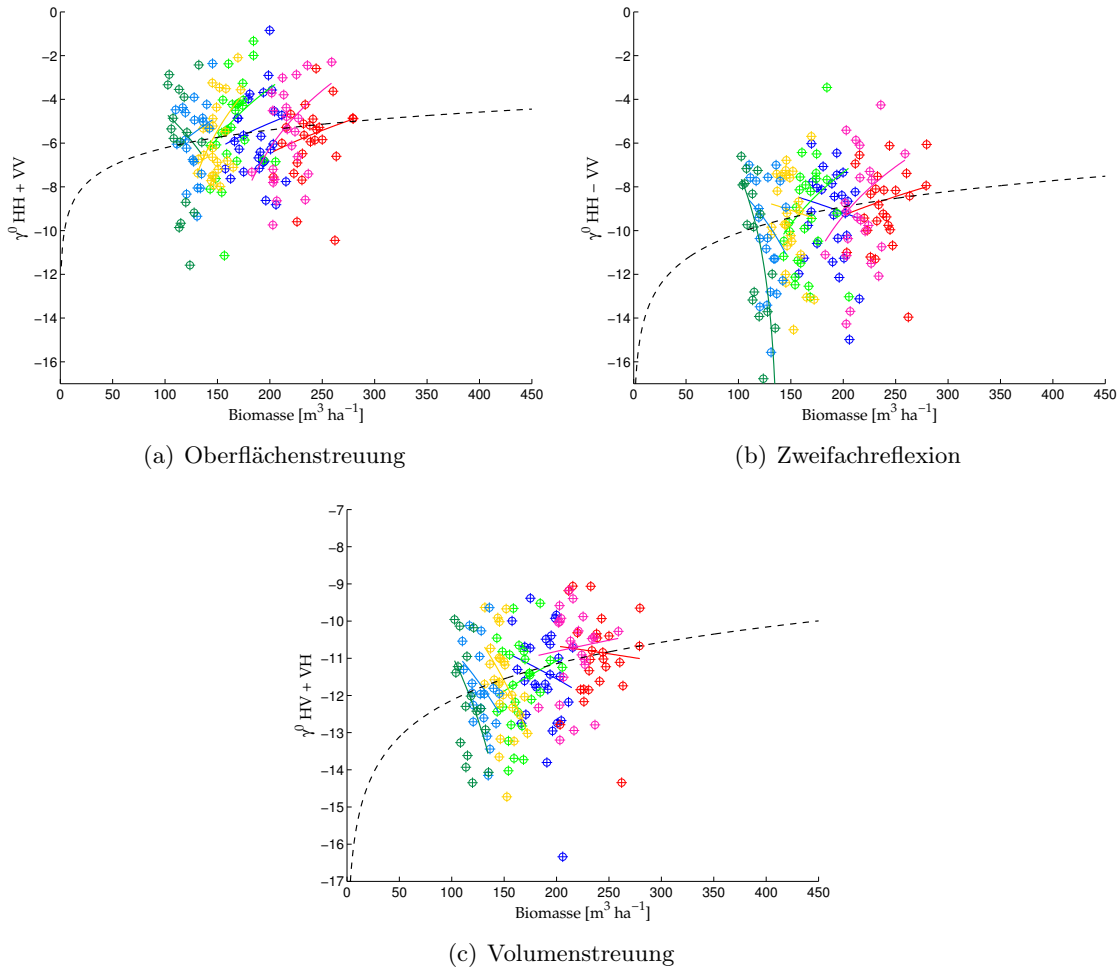


ABB. 3.45: Aufschlüsselung der Stichproben $B > 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in Ausdünnungslinien für einen Ausdünnungsparameterwert $d = 0.88$, Testgebiet t01 *Krycklan*. Die Farben verdeutlichen die Zugehörigkeit zu den einzelnen Ausdünnungslinien.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass die beobachtete Streuung in den Daten des Testgebietes Krycklan auf unterschiedliche Ausdünnungsdynamik im Testgebiet zurückzuführen ist. Diese Unterschiede können in differierender Standortgunst, aber auch in unterschiedlicher Bewirtschaftung begründet sein, wobei die untersuchten Standortparameter keinen signifikanten Einfluss zeigen. Es kann weiter festgestellt werden, dass die Zunahme der Ausdünnung mit höherer Biomasse, was durch die Parametrisierung des zweiten Modells mit negativem Parameter c schon gezeigt wird, auch durch die Schätzung des Ausdünnungsparameters d aus Inventurdaten nachvollzogen werden kann. Die Schätzung dieses Parameters ist auf Grund der grossen Streuung schwierig. Als Median des Ausdünnungsparameters d für alle Bestände wird $d = 0.84$ geschätzt, was für die Volumenstreuung einem Parameter $f = 0.44$ entsprechen würde. Deutlich wird aber,

dass der Ausdünnungsparameter d einzelner Bestände nahe bei den Werten der Einzelbaumrückstreueung r liegt. Die numerische Ableitung des Rückstreuparameters aus Einzelbaumrückstreueung r und Ausdünnungsparameter d ist in diesem Fall nicht erfolgversprechend, da die unterschiedlichen Startbedingungen der Ausdünnungslinien die Rückstreueung stärker beeinflussen als die Veränderung der Biomasse entlang der Ausdünnungslinie.

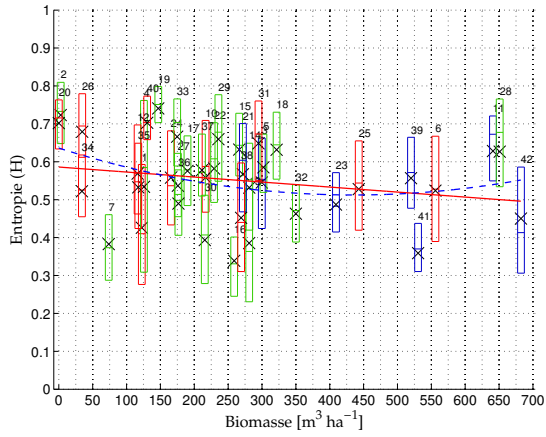
Eine für die Biomasseinversion ungünstige Schlussfolgerung ist, dass für diese Ausdünnungsverläufe mit den hohen Werten des Ausdünnungsparameters d die beobachteten Zusammenhänge zwischen Rückstreueung und Biomasse zu einem hohen Grad dem Zufall unterliegen. Die Zufälligkeit liegt einerseits in der Variabilität der Ausdünnung im Testgebiet begründet, andererseits aber auch in der Auswahl der Stichproben, die eine eindeutige Identifikation einzelner Ausdünnungslinien nicht zulässt.

3.8 Parameter der inkohärenten Dekomposition und Vegetationsparameter

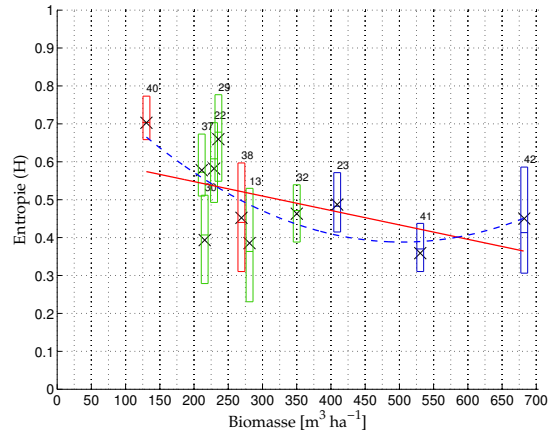
Die Parameter der inkohärenten Dekomposition nach Cloude, vor allem die drei Hauptparameter Entropie (H), α und Anisotropie (A) könnten die Schätzung der Biomasse unterstützen, da sie nicht von der absoluten Rückstreueung abhängen. Neumann et al. haben in [Neumann 12] anhand der Daten aus dem Testgebiet Krycklan gezeigt, dass zwischen α -Winkel und Biomasse eine positive Korrelation beobachtet werden kann.

Die Darstellung der Dekompositionsparameter aus den Messungen im Testgebiet Hinwil in ABB. 3.46 zeigt diese Abhängigkeit von der Biomasse nicht. In der Grafik werden alle Stichproben dargestellt. Die Einschränkung auf die Stichproben mit hohem Bedeckungsgrad zeigt dasselbe Bild von verschwindender Korrelation zwischen Biomasse und Parameterwert für α und Anisotropie und eine negative Korrelation mit der Entropie.

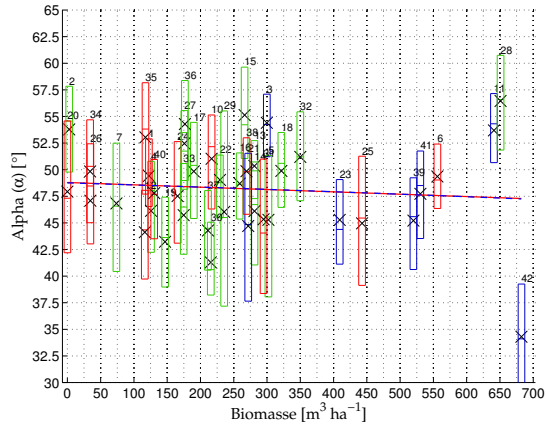
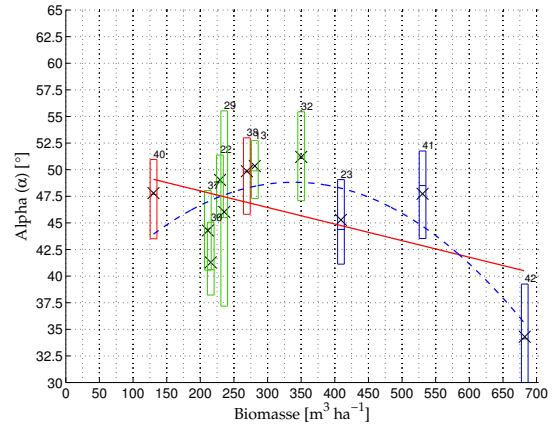
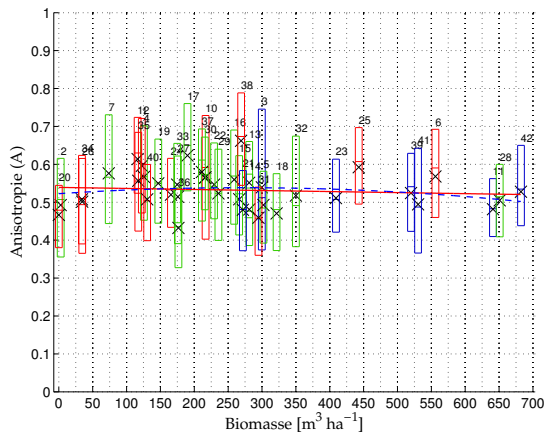
Die Vermutung liegt nahe, dass die Biomasse alleine nicht den erklärenden Mechanismus für den α -Winkel darstellt. Auf Grund der festgestellten starken Ausdünnung im Testgebiet Krycklan muss die Ursächlichkeit des in Neumann et al. [Neumann 12] gefundenen Resultates in Frage gestellt werden. Unbestritten ist, dass die Erhöhung der Baumanzahl auf einer Fläche vorerst den α -Wert erhöht. Waldflächen weisen gegenüber einer freien Fläche höhere α -Werte auf. Sobald aber die Ausdünnung einsetzt, reduziert sich die Baumanzahl bei Erhöhung der Einzelbaumbiomasse. Somit müsste die Zweifachreflexion einerseits an Stärke zunehmen, weil die Einzelbäume



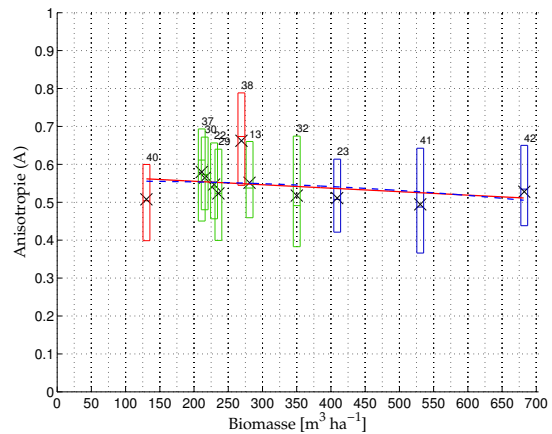
(a) Entropie (H)



(b) Entropie (H), Stichproben > 40% Bedeckung


(c) α

(d) α , Stichproben > 40% Bedeckung


(e) Anisotropie (A), alle Stichproben



(f) Anisotropie (A), Stichproben > 40% Bedeckung

ABB. 3.46: Parameter der Entropie- α Dekomposition nach Cloude [Cloude 96], Referenz-track, Testgebiet *Hinwil*. Rot: lineare Regression 1. Grad, blau: lineare Regression 2. Grad. Die Farben der Stichprobensymbole entsprechen der Spezies.

über mehr Biomasse verfügen und dadurch einen höheren Rückstreuquerschnitt haben. Andererseits aber müsste für eine Erhöhung des α -Winkels die Zweifachreflexion so stark zunehmen, dass die auf Grund der Ausdünnung vermehrt auftretenden Oberflächenstreuungen (einerseits an den grösseren Bäumen, aber auch direkt am Boden) und die Reduktion der Baumanzahl pro Fläche überkompensiert werden könnten. Wie die Messungen im weniger stark von der Ausdünnung betroffenen Testgebiet Hinwil zeigen, halten sich die beiden Veränderungen gerade die Waage. Der α -Winkel zeigt keine eindeutige Abhängigkeit von der Biomasse. In Gebieten mit stärkerer Ausdünnung wie im Testgebiet Krycklan müsste die Zunahme der Oberflächenstreuung überwiegen. Dies führt zu folgenden Hypothesen:

- Der Parameter α zeigt eine positive Korrelation mit der Stammanzahl pro Fläche.
- Der Parameter α zeigt eine negative Korrelation mit der Gesamtbiomasse pro Fläche in Gebieten mit starker Ausdünnung.

In ABB. 3.47 wird der α -Parameter in Abhängigkeit der Baumanzahl gezeigt. Die positive Korrelation mit der Stammanzahl lässt sich belegen. Gemäss des Ausdünnungskonzeptes müssten die Stichproben mit hoher Stammanzahl der kleinsten Gesamtbiomasse entsprechen. Der α -Parameter zeigt jedoch eine sehr hohe positive Korrelation mit eben dieser Gesamtbiomasse, was durch eigene Untersuchung sowie durch Neumann et al. in [Neumann 12] belegt wird. Die hohe positive Korrelation des α -Winkels mit der Biomasse macht den α -Parameter im Testgebiet Krycklan für die Biomasseinversion nutzbar. Die oben formulierte Hypothese der negativen Korrelation mit der Gesamtbiomasse wäre somit nicht haltbar. Wie aber der Vergleich mit dem Testgebiet Hinwil zeigt, ist der Parameter nicht allgemein mit der Biomasse korreliert. Dieser anscheinende Widerspruch lässt sich wieder mit der Ausdünnung erklären. In ABB. 3.48 ist der α -Winkel der einzelnen Ausdünnungslinien gezeigt. Er zeigt in den Linien wie erwartet deutlich negative Verläufe, was die Hypothese bestätigt. Die Gesamtheit der Linien zeigt aber im Mittel wieder einen deutlich positiv korrelierten Verlauf. Der Parameter Entropie zeigt in ABB. 3.49 einen zum α -Parameter analogen Verlauf, die Anisotropie zeigt in ABB. 3.50 ansteigende Verläufe in den Ausdünnungslinien.

Die Position einer Stichprobe auf der Ausdünnungsline ist demnach anhand der Dekompositionsparameter-Werte identifizierbar. Hohe Parameterwerte für α und H markieren den Beginn einer Ausdünnungsline, also die kleinen Einzelbaumbiomassen. Die Anisotropie zeigt den Beginn einer Ausdünnungsline mit höheren Werten.

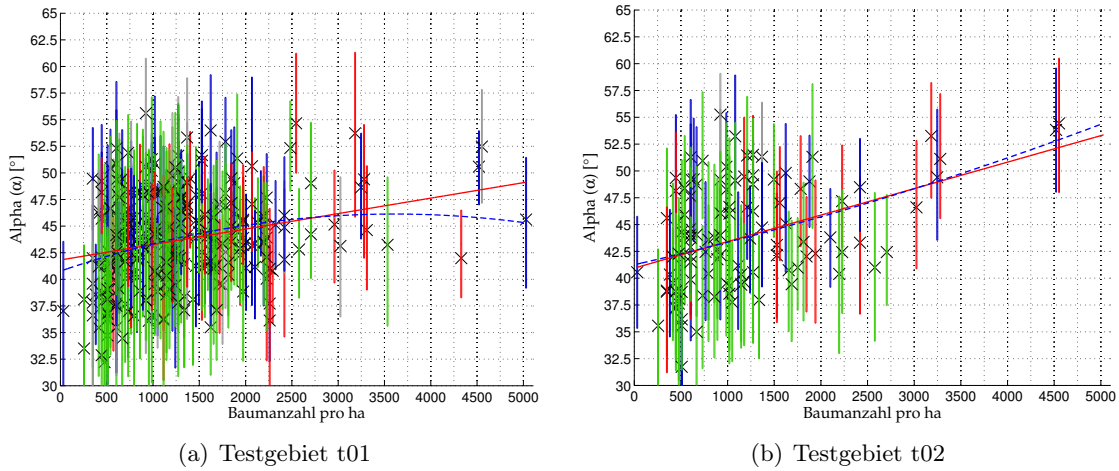


ABB. 3.47: α -Parameter in Abhängigkeit der Baumanzahl pro ha, Testgebiet *Krycklan*. Rot: Regression ersten Grades, blau: quadratische Regression.

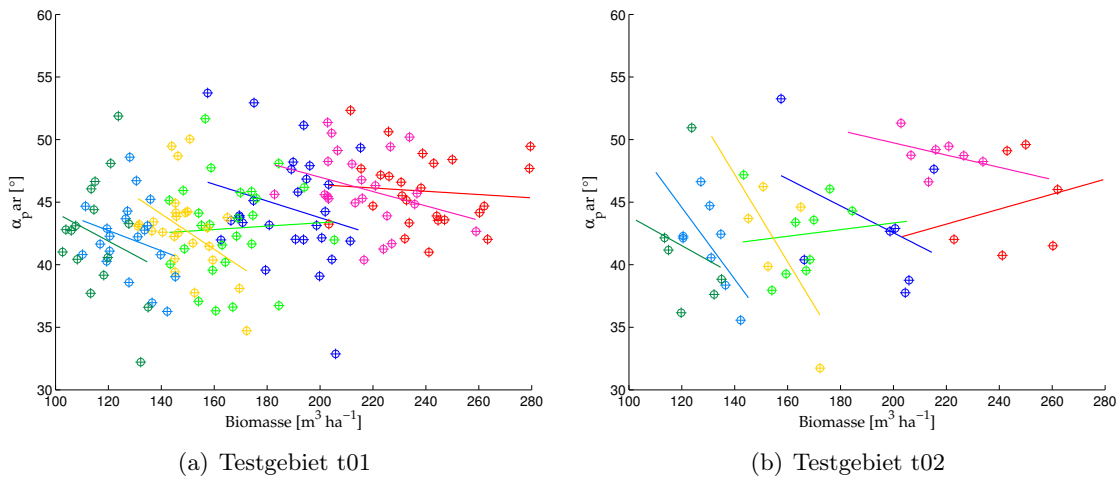


ABB. 3.48: α -Parameter in den einzelnen Ausdünnungslinien mit $d = 0.88$, Testgebiet *Krycklan*.

Die Lage auf der Ausdünnungslinie ist verknüpft mit einer vom modellierten Erwartungswert abweichenden Rückstreuung, die zu erheblichen Fehlern in der Biomasseinversion führen kann. Für Stichproben, die am Anfang der Ausdünnungslinie liegen, sind zu hohe Rückstreuwerte zu erwarten, also eine *Überschätzung* der Biomasse. Stichproben am Ende der Ausdünnungslinie weisen zu tiefe Werte auf, *unterschätzen* also die Biomasse.

Wenn die Dekompositionsparameter eine Information über die Position auf einer Ausdünnungslinie beinhalten, kann ein Zusammenhang zwischen Dekompositionsparameter und Schätzfehler hergestellt werden. In ABB. 3.51 wird dieser Zusammenhang gezeigt, indem die Stichpro-

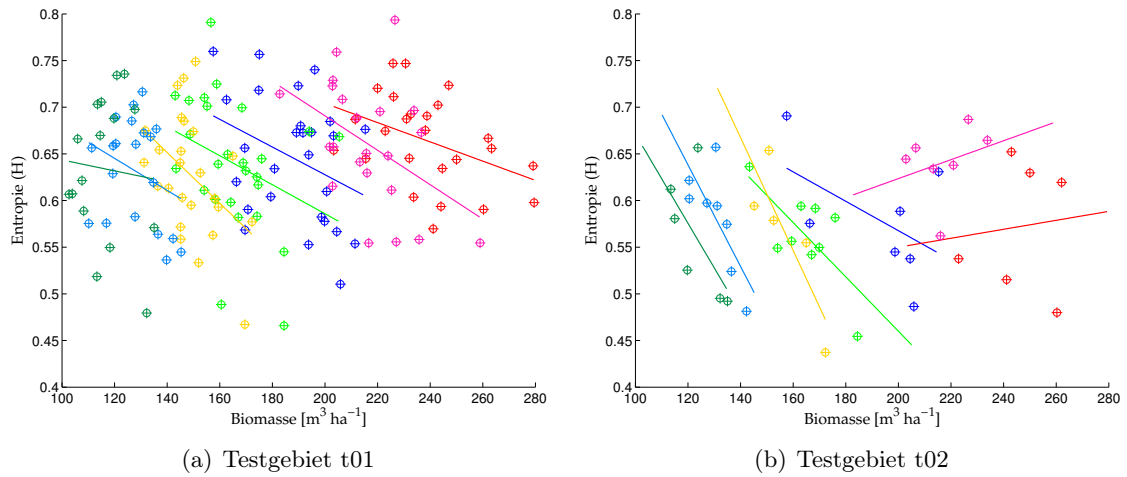


ABB. 3.49: Entropie-Parameter in den einzelnen Ausdünnungslinien mit $d = 0.88$, Testgebiet *Krycklan*.

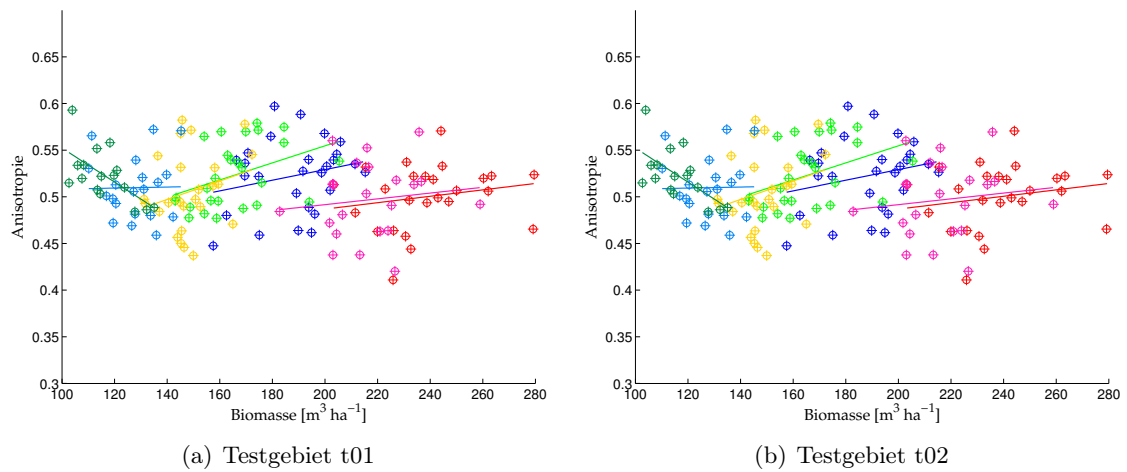


ABB. 3.50: Anisotropie-Parameter in den einzelnen Ausdünnungslinien mit $d = 0.88$, Testgebiet *Krycklan*.

benwerte für den α -Parameter und für die Biomasse nach aufsteigender Rückstreuung sortiert und einem linearen *detrend* unterzogen wurden. Die Korrelation des Musters der beiden Graphen ist sichtbar, wenn auch an einigen Stellen stark verrauscht. Die Berechnung der Korrelation zwischen so behandelten Dekompositionsparameterwerten und Biomassewerten in ABB. 3.52 zeigt deutlich, dass die für eine Biomasseinversion oder eine Modellierung der Rückstreuung zu erwartenden Fehler mit der Abweichung der Dekompositionsparameter vom erwarteten Wert korreliert sind. Die Korrelation ist für den α -Parameter am grössten, die Entropie zeigt eine kleinere Korrelation und die Anisotropie eine ähnliche, aber negative Korrelation. Dies bestätigt einerseits die

oben abgeleitete Aussage, dass die Parameterwerte stark durch die Ausdünnung beeinflusst sind und entlang einer Ausdünnungslinie stark ändern. Weiter wird aber auch die Annahme bestätigt, dass der α -Parameter entlang einer Ausdünnungslinie einem Verlauf mit negativer Steigung folgt. Wäre das nicht so, würde keine positive Korrelation zwischen Rückstreuungsabweichung und Parameter bestehen. Daraus folgt aber weiter, dass die gemessene hohe Korrelation zwischen α -Parameter und Rückstreuung im Testgebiet Krycklan zu einem hohen Grad zufälligen Charakter hat. Je nach Beprobung der Ausdünnungslinien ändert sich die Korrelation stark.

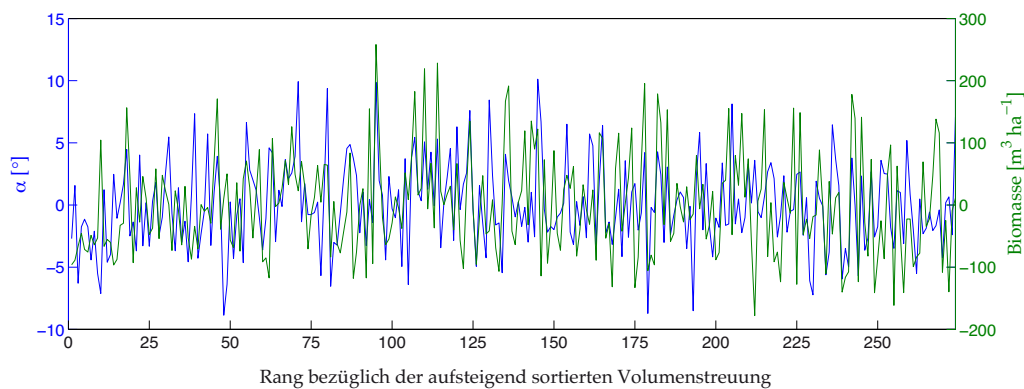


ABB. 3.51: Parameter α und Biomasseabweichung nach linearem *detrend* gegen nach Volumenstreuung rangierte Stichproben. Der höchste Rang entspricht der höchsten Rückstreuung, Testgebiet t01, Krycklan.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, die festgestellte Korrelation zwischen Abweichungen der Parameter α , Entropie und Anisotropie und Rückstreuwerten dazu zu nutzen, die Schätzfehler bezüglich Biomasse im Testgebiet Krycklan zu korrigieren. Eine Korrektur des Rückstreuwertes oder des Biomassewertes durch den Dekompositionsparameterwert nach einem linearen *detrend* ist grundsätzlich möglich, die erzielte Verbesserung des mittleren Fehlers (RMSE) im Hinblick auf eine Biomasseinversion beträgt im besten Fall für den α -Parameter allerdings nur $\sim 2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

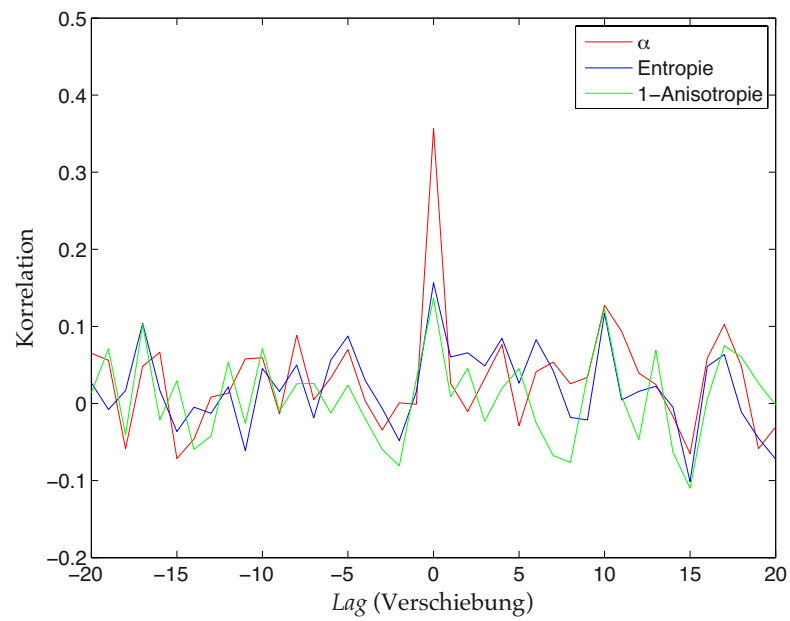


ABB. 3.52: Korrelation zwischen Biomasseabweichung und Dekompositionsparameterabweichung, Testgebiet t01, *Krycklan*.

3.9 Anknüpfung an bestehende Resultate

In den Arbeiten von Neumann et al. [Neumann 12] und Soja et al. [Soja 13] wurde ebenfalls das Testgebiet Krycklan untersucht. Eine Zusammenfassung der Resultate der Arbeit von Neumann et al. ist in ABB. 2.22 in unveränderter Form wiedergegeben. Verglichen mit den in dieser Arbeit gezeigten Resultaten zeigt sich im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung, was bei der Verwendung des identischen Datensatzes zu erwarten ist. Die in dieser Arbeit nach der Korrektur der gefundenen Einflussfaktoren erreichten Korrelationen zwischen Rückstreuung und Biomasse liegen höher als die in Neumann et al. dargestellten.

In ABB. 3.53 sind die Resultatdarstellung aus [Soja 13] gezeigt. Das Modell M2 beruht auf der kreuzpolaren Rückstreuung alleine und kann einfach in die Form umgerechnet werden, die der in dieser Arbeit verwendeten Modellparametrisierung entspricht. In TAB. 3.2 ist die so umgerechnete Parametrisierung bereits gezeigt. Die Modellparametrisierung durch Soja et al. entspricht deutlich nicht der in dieser Arbeit gefundenen Parametrisierung. Der Rückstreuparameter $f = 0.67$ nach Soja liegt viel höher als der oben gezeigte. Die Parametrisierung ist somit keine passende Beschreibung der Resultate, die in ABB. 3.53 in unveränderter Form wiedergegeben werden. Die kreuzpolare Rückstreuung zeigt eine sehr starke Sättigung, die Rückstreuung nimmt für höhere Biomassen sogar wieder ab. Der in derselben Arbeit tabellierte Parameterwert $f = 0.67$ beschreibt aber eine geringe Sättigung, vergleichbar mit dem Testgebiet Hinwil. Eine Erklärung dafür ist, dass in [Soja 13] als Trainingsstichproben für das Modell nur durch LiDAR-Messungen unterstützten Biomasseschätzungen verwendet wurden, die eine geringe Vegetationsbedeckung aufwiesen. Dies im Gegensatz zu den hier gezeigten Resultaten, in denen alle Stichproben miteinbezogen werden. Das kann erklären, weshalb die Modellparametrisierungen für höhere Biomassen in [Soja 13] keine passende Beschreibung liefern. Wie gezeigt werden konnte, ist die Ausdünnung für kleinere Bäumen unter Umständen geringer als für grössere. Für kleine Bäume konnte ein Ausdünnungskoeffizient $d \sim 0.75$ gefunden werden, was zum gezeigten Parameter f passen würde. Weiter fällt auf, dass die in Krycklan gefundene Rückstreuung in Soja et al. gegenüber dem zweiten in ihrer Arbeit untersuchten Testgebiet Remningstorp ca. 2 dB tiefer liegt. Ein ähnlich grosser Unterschied zwischen den Testgebieten kann in dieser Arbeit bestätigt werden. Die Rückstreuung des Testgebietes Hinwil liegt für höhere Biomassen um ~ 2 dB höher, für den Bereich um $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jedoch sind die Werte zwischen den Testgebieten gut vergleichbar. Dies wird durch LeToan et al. in [Le Toan 11] bestätigt. Es wird gezeigt, dass

die Verschiebung der Rückstreustärke im Vergleich über verschiedene Testgebiete äusserst gering ausfällt. Allerdings ist die Ausdünnung in Krycklan deutlich höher als im Testgebiet Hinwil, was sich durch eine starke Sättigung vor allem bei höheren Biomassen bemerkbar macht.

An dieser Stelle wird ohne weitere Besprechung der beiden Kampagnen ein Vergleich mit dem im Rahmen der BioSAR-3-Kampagne beprobten Wald-Testgebiet in Remningstorp gezeigt. Nähere Informationen über die Kampagne findet sich in [Ulander 11a]. In ABB. 3.54 wird die Ausgabe des auf die Inventurdaten des Testgebiet angewendeten *thinning detector* gezeigt. Auch wenn das Resultat auf Grund der kleinen Zahl von Stichproben ($n = 7$), für die die Baumanzahl erhoben worden ist, nicht eindeutig ausfällt, wird die Ausdünnung kleiner geschätzt. Wenn der Wert um $d = 0.2$ als zu klein ausgeschieden wird, bleibt eine mit dem Testgebiet Hinwil vergleichbare Ausdünnung um $d \sim 0.7$. Remningstorp und Hinwil müssten also von der Rückstreuung her vergleichbar sein. Dies wird durch die Resultate in [Soja 13] bestätigt, wiedergegeben in ABB. 3.53.

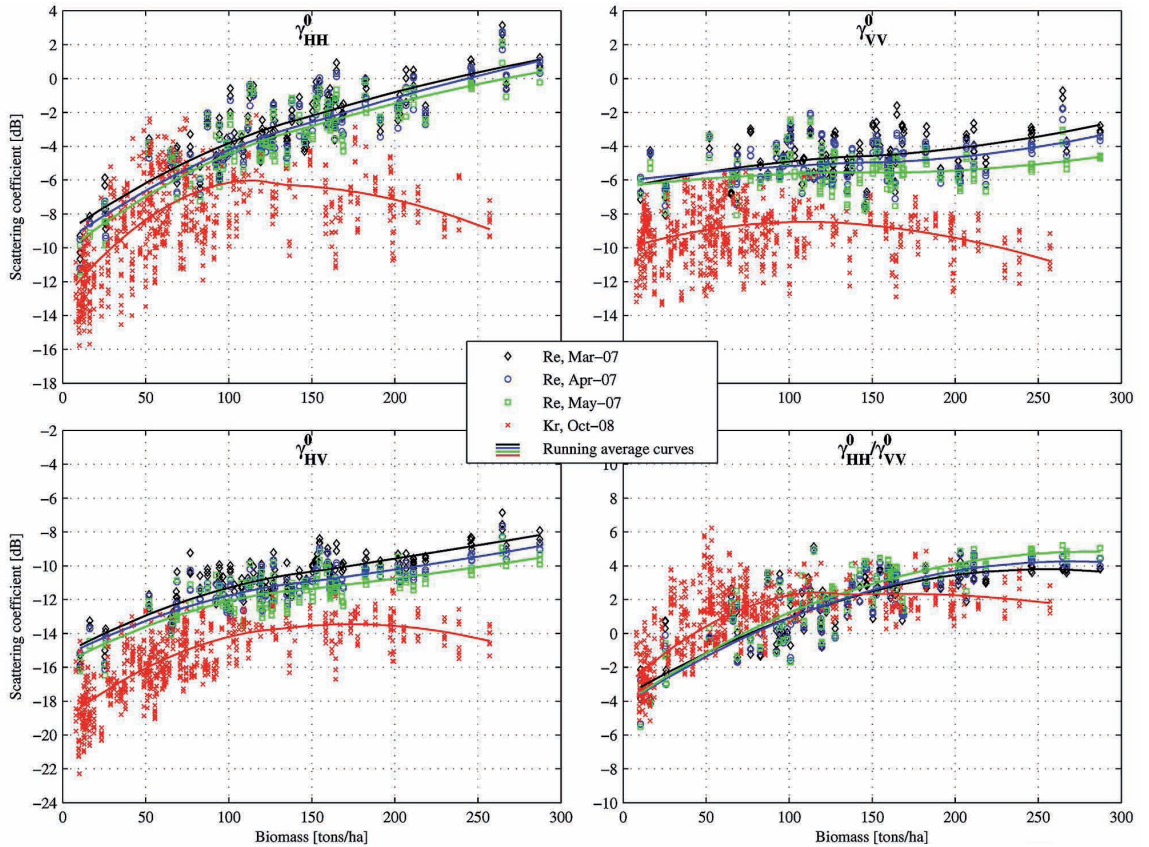


ABB. 3.53: Resultate nach Soja. Das Modell M2 entspricht der Verwendung nur des kreuzpolaren P-Band Kanals. Rot: Testgebiet Krycklan, blau, schwarz und grün: Testgebiet Remningstorp. Aus [Soja 13].

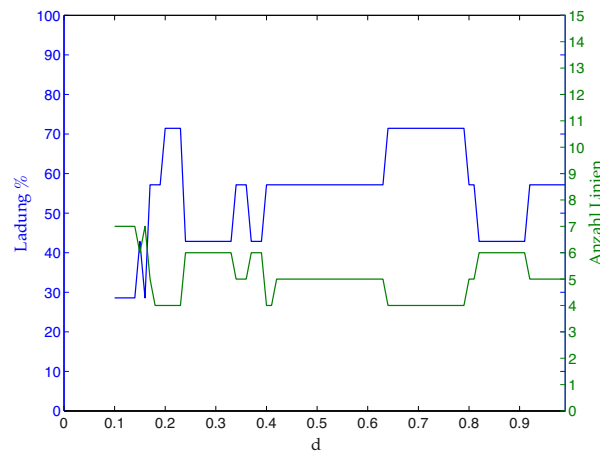


ABB. 3.54: Schätzung der Ausdünnung, *Remningstorp*.

Nach Berücksichtigung der abweichenden Resultate verbleibt die Erkenntnis, dass in der vorliegenden Arbeit, aber auch in der Arbeit von Soja et al. die verschiedenen Testgebiete hinsichtlich der absoluten Rückstreustärke für kleine Biomassen vergleichbar sind, aber im Gesamtbild deutlich abweichen. Auch das in dieser Arbeit untersuchte Testgebiet Hinwil unterscheidet sich deutlich durch eine stärkere Zunahme der Rückstreuung mit Zunahme der Biomasse vom Testgebiet Krycklan.

Wie in KAPITEL 3.7.2 gezeigt werden konnte, sind diese Unterschiede in erster Linie durch die unterschiedliche Ausdünnung erklärbar. Weiter führen Strukturparameter zu einer erhöhten Streuung, die die Modellanpassung stark beeinflusst. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass die Stichprobenerhebung unter Umständen für eine Messung der Rückstreuung nicht ideal erfolgte, weil die Stichproben zu nah an strukturellen Diskontinuitäten lagen.

3.10 Simulation von *SAR*-Daten

In diesem Teil werden die Resultate der *SAR*-Datensimulation gezeigt. Das Ziel ist es, die Daten der beiden Testgebiete nachzubilden. Dafür muss eine passende Modellparametrisierung gefunden werden. Die einzelnen Parameter werden in einem ersten Schritt isoliert verändert und die Effekte dargestellt. Im Anschluss werden die in den Testgebieten gefundenen Abhängigkeiten von der Struktur nachgebildet und schliesslich Waldbestände so parametrisiert, dass sie möglichst nahe an die *SAR*-Messungen aus den Testgebieten heranreichen. Alle simulierten Daten basieren auf der Azimut-fokussierten Näherung (vgl. KAPITEL 2.1.6) und wurden nach der *range*-Fokussierung gleich verarbeitet wie die *SAR*-Daten der beiden Testgebiete.

3.10.1 Simulierte Auswirkungen verschiedener Vegetationsparameter

In der Folge werden die Strukturparameter, die sich in Kapitel 3.6 als erklärend für die gemessene Streuung erweisen haben, in der Simulation untersucht. Zusätzlich werden die Einflüsse dielektrischer Eigenschaften von Boden und Holz dargestellt.

Positionierung der Bäume

Die in den Stichproben auftretende Streuung könnte darin begründet sein, dass die Baumabstände so gross sind, dass direkte Bodeninteraktionen stattfinden können. Daher wird in dieser ersten Simulation untersucht, wie sich ein veränderter Einzelbaumabstand auf die Streuung in den Messwerten auswirkt. Die Baumpositionierung gemäss Kapitel 2.2.3 lässt eine zufällige, normalverteilte zweidimensionale Abweichung vom regelmässigen Gitter zu. In ABB. 3.55 wird die Auswirkung einer zunehmenden Standardabweichung von den Gitterpositionen auf die Rückstreuung gezeigt. Die zentralen Systemparameter für die Simulation sind: Mittenfrequenz 350 MHz, Bandbreite 100 MHz, Pulsrepetitionsfrequenz (PRF) 100 Hz, *off nadir*-Winkel 56° .

Die Zunahme der Streuung ist zu erwarten, erstaunlich ist lediglich, dass auch ohne Abweichung vom Gitter schon eine hohe Streuung auftritt. Je höher die Abweichung, desto eher besteht die Möglichkeit, in der Stichprobe leere Flächen zu erfassen, was den sprunghaften Anstieg der Streuung bei einer Standardabweichung von 5 m erklärt. Die Grössenordnung der Streuung von ~ 5 dB ist vergleichbar mit den gefundenen Werten in beiden Testgebieten, wenn auch in den Messungen teilweise kleinere Streuungen gefunden werden. Die Schlussfolgerung aus diesem Ver-

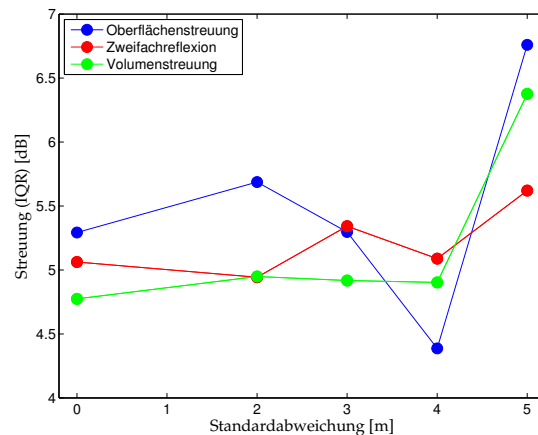


ABB. 3.55: Streuung gemessen als Interquartilabstand (IQR) in Abhängigkeit der Standardabweichung der Einzelbaumpositionen vom regulären Gitter mit Maschenweite 8m. Das virtuelle Alter des Baummodells beträgt 20 Jahre.

such ist, dass die Standardabweichung der Einzelbaumpositionen für die Simulation kein zentraler Wert darstellt. Um aber directionale Effekte zu mindern, die auf Grund einer Anordnung in einem regelmässigen Raster auftreten können, sollte eine zufällige Abweichung beibehalten werden. Sie sollte aber nicht so gross sein, dass grosse freie Flächen auftreten. Dies hat sich in den Messungen von Stichproben des Testgebietes Hinwil als nachteilig erwiesen. Als empirisches Mass für die Standardabweichung in der Simulation kann, basierend auf den durchgeführten Untersuchungen, für die Standardabweichung $1/4$ der Gitterweite angegeben werden.

Boden und Holz

In KAPITEL 3.6 konnte auf Grund von fehlender Variabilität der Messdaten kein Einfluss der Bodenfeuchte auf die Rückstreuung festgestellt werden. In diesem Abschnitt wird daher gezeigt, wie variable Holz- und Bodenfeuchtigkeit die simulierte Rückstreuung beeinflussen. Die zentralen Systemparameter der Simulation sind dieselben wie für die vorhergehende Simulation. Um die Einflüsse isoliert darzustellen, wurde ein Waldbestand basierend auf dem 20jährigen Baummodell mit einer Maschenweite von 7 m simuliert, was einer Biomasse von $\sim 70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ entspricht.

Zum Überblick werden die dielektrischen Parameter in der TAB. 3.29 wiedergegeben. Für die Holzfeuchtigkeit entsprechen die Feuchtigkeitsstufen 40% (trocken), 60% (mittlere Feuchte) und 80% (feucht).

	trocken	mittlere Feuchte	feucht
Boden $\epsilon_{r_{\text{ground}}}$	$5.5 + 1.5i$	$11.5 + 2.25i$	$17.5 + 3i$
Holz ϵ_{\parallel}	$9.70 + 1.78i$	$13.07 + 2.49i$	$16.43 + 3.26i$
Holz ϵ_{\perp}	$6.47 + 1.08i$	$8.69 + 1.22i$	$10.90 + 1.25i$

TAB. 3.29: Relative Permittivität ϵ_r des Bodens und des Holzes.

In einer ersten Simulation in ABB. 3.56 wurde die Holzfeuchtigkeit konstant bei 40% gehalten und die Leitfähigkeit des Bodens variiert, was einer Variation der Bodenfeuchte entspricht. Der Boden hat in dieser Simulation keine Rauigkeit, reflektiert also spekulär ein starkes Signal.

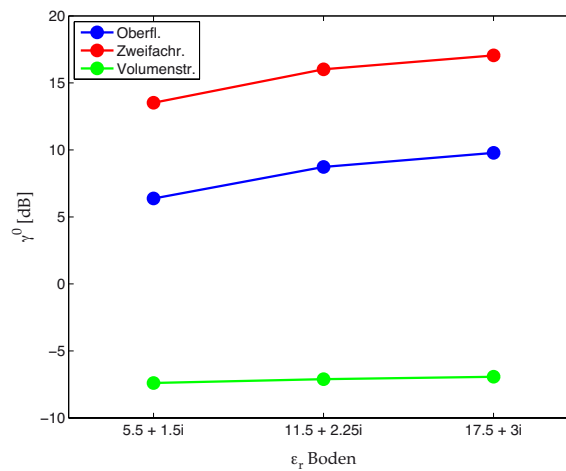


ABB. 3.56: Simulierte Auswirkung variabler Bodenfeuchte, Boden ohne Rauigkeit, Holzfeuchtigkeit 40%, 20jähriges Baummodell, Maschenweite der Baumpositionen 7 m.

In der folgenden Simulation in ABB. 3.57 wird die Holzfeuchtigkeit variiert. Die Leitfähigkeit des Bodens entspricht der mittleren Feuchte, der Boden hat keine Rauigkeit.

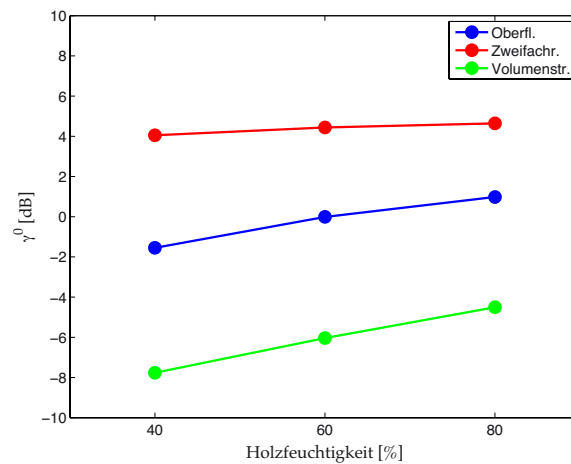


ABB. 3.57: Simulierte Auswirkung variabler Holzfeuchtigkeit zwischen 40% und 80%, Boden ohne Rauigkeit bei mittlerer Feuchtigkeit, 20jähriges Baummodell, Maschenweite der Baumpositionen 7 m.

In der letzten Simulation in ABB. 3.58 wird die Bodenrauigkeit variiert. Die Leitfähigkeit des Bodens und des Holzes entsprechen der mittleren Feuchtigkeit.

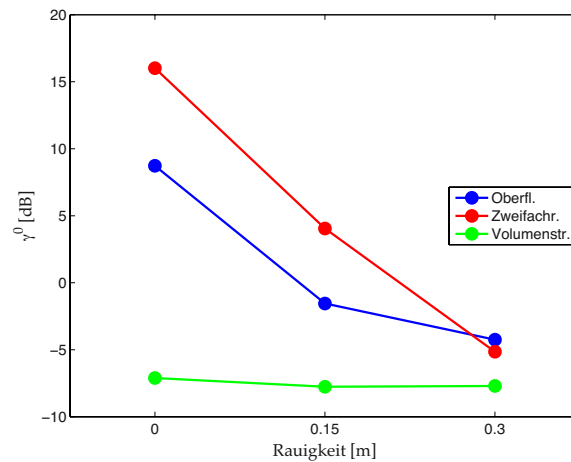


ABB. 3.58: Simulierte Auswirkung variabler Bodenrauigkeit, die Leitfähigkeit des Bodens und des Holzes entsprechen der mittleren Feuchtigkeit. 20jähriges Baummodell, Maschenweite der Baumpositionen 7 m.

Die gezeigten Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Ein glatter Boden mit realitätsnahen Annahmen zur Leitfähigkeit führt zu einem sehr starken Signal. Die Intensität in der Zweifachreflexion übertrifft die der Oberflächenstreuung, was in natürlichen Situationen nicht beobachtet wird. Die Volumenstreuung bleibt von der Änderung der Bodenreflektivität weitgehend unbeeinflusst.

2. Eine Änderung der Leitfähigkeit des Holzes wirkt sich auf alle Mechanismen aus, auf die Oberflächenstreuung nur schwach, dafür reagieren Volumenstreuung und Zweifachreflexion mit einer deutlichen Verstärkung bei erhöhter Holzfeuchtigkeit.
3. Eine Erhöhung der Bodenreflektivität durch Reduktion der Rauigkeit führt zu einer stärkeren Rückstreuung in der Zweifachreflexion im Vergleich zur Oberflächenstreuung.

Daraus werden für die Parametrisierung der Simulation folgende Schlussfolgerungen gezogen:

1. Eine Erhöhung der absoluten Rückstreuung in allen Streumechanismen kann erreicht werden, indem die Bodenfeuchtigkeit zusammen mit der Holzfeuchtigkeit erhöht wird.
2. Das Verhältnis zwischen den beiden kopolaren Mechanismen kann durch die Bodenrauigkeit beeinflusst werden. Allerdings führt eine hohe Bodenrauigkeit zu einer relativen Verstärkung der Volumenstreuung.

Da der Bodenrauigkeit eine wichtige Rolle zukommt, wurde anhand von den Daten des Testgebietes Krycklan die Bodenrauigkeit genauer untersucht. In ABB. 3.59 werden zwei Bodentypen mit ihren gemessenen Streumechanismen gezeigt. Der landwirtschaftlich genutzte Boden zeigt sich in der farbkodierten Darstellung als dunkle, rückstreuarme Fläche. Im Gegensatz dazu erscheint der natürliche Boden (Taigaboden), der auch in Wäldern die typische Bodenform darstellt, in der farbkodierten Darstellung ähnlich hell wie der umgebende Wald (vgl. 3.11 und 3.13). Die Streumechanismen zeigen zwar für beide Bodentypen prinzipiell dasselbe Verhalten, so ist die Oberflächenstreuung klar der dominante Mechanismus, die Volumenstreuung liegt rund 6 - 8 dB tiefer. Doch der naturbelassene Bodentyp zeigt ohne Baumbedeckung Rückstreuintensitäten, die im Bereich der Waldgebiete mit tiefer Biomasse liegen. Der Boden ist also deutlich rauer als der landwirtschaftlich genutzte Boden.

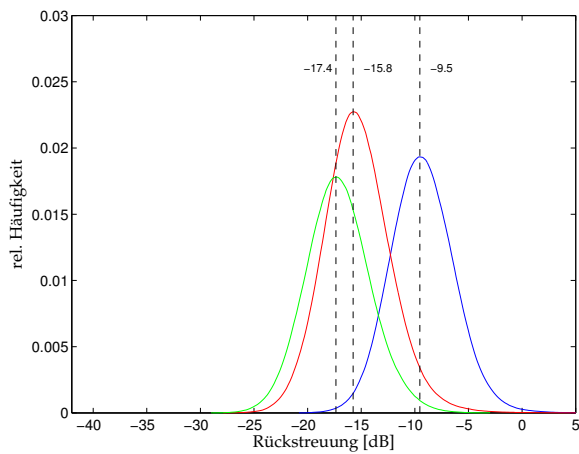
Dies erlaubt eine weitere Schlussfolgerung: Wenn der Boden alleine in der Lage ist, derart hohe Rückstreuwerte zu verursachen, ist anzunehmen, dass auch mit einer geringen Vegetationsbedeckung diese Bodenmechanismen in einem relevanten Anteil im gemessenen Signal enthalten sind. Diese Annahme würde erklären, weshalb für die Einzelbaumrückstreuung r im Testgebiet Krycklan in Stichproben mit geringer Vegetationsbedeckung Werte für r gefunden wurden, die deutlich nicht der Rayleigh-Annahme entsprechen. Wenn der Boden selbst eine konstante und in der Höhe mit der Rückstreuung vom Vegetationsvolumen vergleichbare Rückstreuung beiträgt, kann aus den Messungen die Einzelbaumreflexion nicht verlässlich geschätzt werden. Ebenso



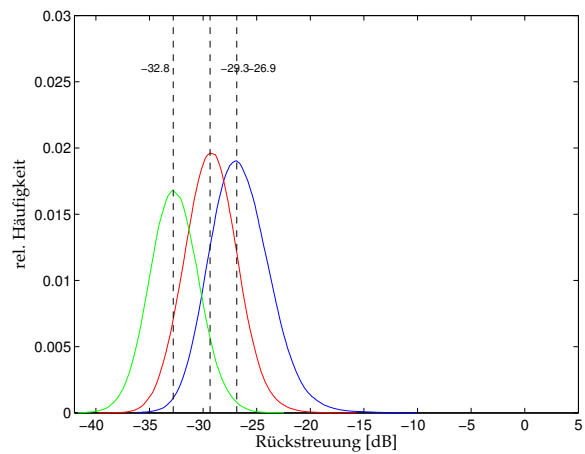
(a) Waldboden



(b) Landwirtschaftsfläche



(c) Waldboden



(d) Landwirtschaftsfläche

ABB. 3.59: Rückstreuung zweier Bodentypen. Fotografien in (a) und (b) aus [Hajnsek 09], (c) und (d) sind zwei Stichproben von typischen Bodenbedeckungen aus dem Testgebiet *Krycklan*, vgl. ANHANG D.9. Blau: Oberflächenstreuung, rot: Zweifachreflexion, grün: Volumenstreuung, Fluglinien Testgebiet t01.

könnte sich das im Zusammenhang mit der Untersuchung der Mie-Oszillationen festgestellte Fehlen einer stabilen Rückstreuung von tiefen Vegetationsvolumina hiermit erklären lassen. Der zwischen einzelnen Stichproben variierende Einfallswinkel ändert die Bodenrauigkeit, was das Gesamtsignal in diesem Fall stark beeinflusst.

Schichtung

Die in beiden Testgebieten gefundene Abhängigkeit der Rückstreuung von der Schichtung wird in einem simulierten Szenario betrachtet. Die zentralen Systemparameter sind gleich wie für die vorhergehenden Simulationen. Grundlage der beiden Wälder sind identische Baumpositionen auf

einem regelmässigen Raster mit zugelassener zufälliger Abweichung von den Gitterpunkten. Die Maschenweite wurde so gewählt, dass ein Bestand mit $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ erreicht wurde. Der ungeschichtete Wald wurde durch Bäume mit identischem Alter (virtuelles Alter 22 Jahre) bestockt, der geschichtete abwechselungsweise mit Bäumen mit virtuellem Alter 18 Jahre und 24 Jahre. So konnte erreicht werden, dass zwei simulierte Wälder mit einer verschwindenden Differenz in der Gesamtbiomasse ($5.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) miteinander verglichen werden konnten. In ABB. 3.60 wird deutlich, dass beide kopolaren Mechanismen im zweischichtigen Fall deutlich schwächer ausfallen. Die Grössenordnung der Abweichung beträgt rund 2.5 dB, die verglichen mit den Resultaten aus den Testgebieten vergleichbar bis etwas geringer ausfällt (vgl. Kapitel 3.6). Die Volumenstreuung nimmt jedoch im Gegensatz zur Erwartung leicht zu. Hier könnte es sich um eine Limitierung der kohärenten Addition der Einzelbäume ohne Berücksichtigung der Interaktionen zwischen den Einzelbäumen handeln. Die Simulation kann unter dieser Annahme die Abschwächung in der höheren Vegetationsschicht nicht korrekt wiedergeben.

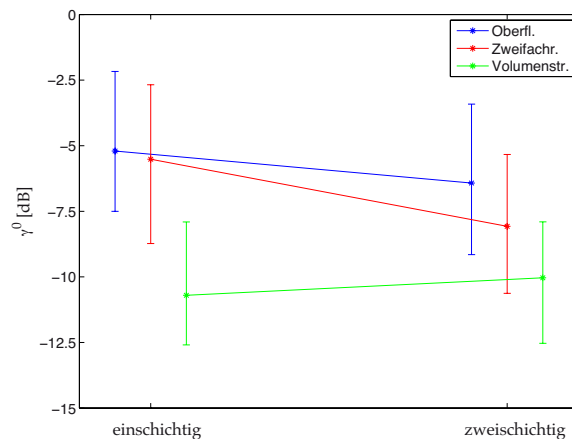


ABB. 3.60: Simulation eines einschichtigen und eines mehrschichtigen Waldes. Die beiden Wälder haben eine verschwindende Differenz in der Biomasse (Differenz $5.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), dennoch nimmt die Rückstreuung der kopolaren Mechanismen deutlich ab.

Die Schlussfolgerung aus dieser Simulation ist, dass die gefundene Abschwächung der kopolaren Mechanismen durch die Mehrschichtigkeit ein haltbarer erklärender Faktor darstellt. Die Grössenordnung der resultierenden Abweichung zeigt auch in der Simulation ein Ausmass, das für die Biomasseschätzung relevant ist. Eine Abweichung von $\sim 2.5 \text{ dB}$ entspricht (je nach Ausdünnung) einer Biomasseänderung von mehreren $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

3.10.2 Vergleich der Simulation mit den SAR-Messungen

In diesem Teil wird die Simulation eines Waldbestandes gezeigt. Um die Werte im Testgebiet Hinwil nachzuvollziehen, wurde die folgende Parametrisierung in TAB. 3.30 verwendet:

Parameter	Wert
Holzfeuchtigkeit	30%
ϵ_r Holz	$\epsilon_{\parallel} : 7.235 + 1.229i$, $\epsilon_{\perp} : 5.669 + 1.001i$
Bodenrauigkeit	0.2 m
Baumalter	16y bis 30y in 2y-Schritten
Baumabstände	5 m bis 6.75 m, in 0.25 m-Schritten
Standardabweichung	$0.2 \times$ Baumabstand
ϵ_r Boden	$5.5 + 1.5i$
<i>off nadir</i> -Winkel	56°

TAB. 3.30: Parameter für die Simulation, Testgebiet *Hinwil*.

Die Parameter des Sensors wurden direkt von den E-SAR-Spezifikationen übernommen, vgl. TAB. 2.3.

Testgebiet Hinwil

Die Baumabstände wurden aus den Forstinventurdaten abgeleitet, wie sie in ABB. 3.37 gezeigt werden. In ABB. 3.61 werden die simulierte Rückstreuung in den einzelnen Streumechanismen den Stichproben aus dem Testgebiet Hinwil gegenübergestellt. Die Grösse der Stichproben in den simulierten Daten stimmt mit der Stichprobengrösse im Testgebiet Hinwil überein. Es wird deutlich, dass die Parametrisierung im Allgemeinen zu gut übereinstimmenden simulierten Daten führt. Mit Ausnahme des kleinsten simulierten Baummodells (virtuelles Alter 16 Jahre) zeigt die Volumenstreuung unter 1 dB Abweichung im Vergleich zu den E-SAR-Daten aus dem Testgebiet Hinwil. Für die anderen Streumechanismen ist die Abweichung höher, allerdings stimmt das Verhalten der Streumechanismen mit den E-SAR-Daten überein.

In ABB. 3.64 werden die Stichprobenmittelwerte aus der Simulation mit dem gemäss TAB. 3.5 - TAB. 3.10 parametrisierten ersten Modell verglichen, wobei die Parametrisierung des Referenz-*tracks* verwendet wurde. Die Simulation trennt ein ~ 2 dB-*offset* von den Daten des Testgebietes Hinwil. Wenn dieser *offset* kompensiert wird, resultieren beim Vergleich der

simulierten Daten mit den E-SAR-Daten aus dem Testgebiet Hinwil R^2 -Werte von 0.87 (Oberflächenstreuung), 0.48 (Zweifachreflexion) und 0.82 (Volumenstreuung).

Fast wichtiger als die gute Übereinstimmung der Stärke der Rückstreuung ist aber, dass das Streumodell die Streumechanismen korrekt wiedergibt. Daher werden in ABB. 3.62 die Parameter der inkohärenten Dekomposition nach Cloude mit und ohne Berücksichtigung der Dipol-Interaktionen verglichen. Auch bezüglich der Streumechanismen zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Anisotropie nimmt für die hohen simulierten Biomassen allerdings im Vergleich mit der Messung zu hohe Werte an. Die Darstellung in der Entropie- α -Ebene in ABB. 3.63 zeigt simulierte Daten und die Daten aus dem Testgebiet im Vergleich. Es kann eine weitgehend übereinstimmende Charakteristik festgestellt werden. Die Simulation ist sogar etwas «zufälliger» als die natürlichen Daten, die Entropie ist höher, was damit erklärt werden kann, dass kein Rauschen und keine direkte Bodenstreuung berücksichtigt wurden, die einen gleichförmigen Hintergrund bilden könnten. Das Resultat ist daher interessant, da bestehende Simulationen dazu tendieren, die Parameter deutlich zu unterschätzen, was im Anschluss diskutiert wird.

Das Simulationsresultat in ABB. 3.61 zeigt weiter, dass nur die Berücksichtigung der Interaktionen zwischen den Dipolen zu diesem Resultat führt. Werden die Interaktionen unterdrückt, stimmen die Verläufe der Rückstreuung deutlich nicht mehr mit den Messungen überein. Besonders in der Volumenstreuung wurde ohne Interaktionen ein deutlich schwächeres Signal registriert. Dies bestätigt die Wichtigkeit der Interaktionen insbesondere für die korrekte Simulation der Volumenstreuung. Die aus der Simulation ohne Interaktionen sichtbare Zunahme der Rückstreuung mit zunehmender Biomasse zeigt eine höhere Steigung. Das kann damit erklärt werden, dass die kleinen Einzeldipole isoliert betrachtet der Rayleigh-Streuung unterliegen und daher die Rückstreuintensität im Maximalfall quadratisch mit dem Volumen zunimmt. Die daraus erwartete Zunahme von ~ 6 dB bei einer Verdoppelung des Biomassevolumens kann in den Grafiken ohne Interaktion in ABB. 3.61 gut nachvollzogen werden. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Simulation diskretisierter Objektmodelle nur unter Berücksichtigung der Interaktionen zu einem realitätsnahen Resultat führt. Die Unterschätzung der Volumenstreuung ohne Interaktionen bei passender Schätzung der anderen Streumechanismen findet sich auch in der Literatur, dies wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

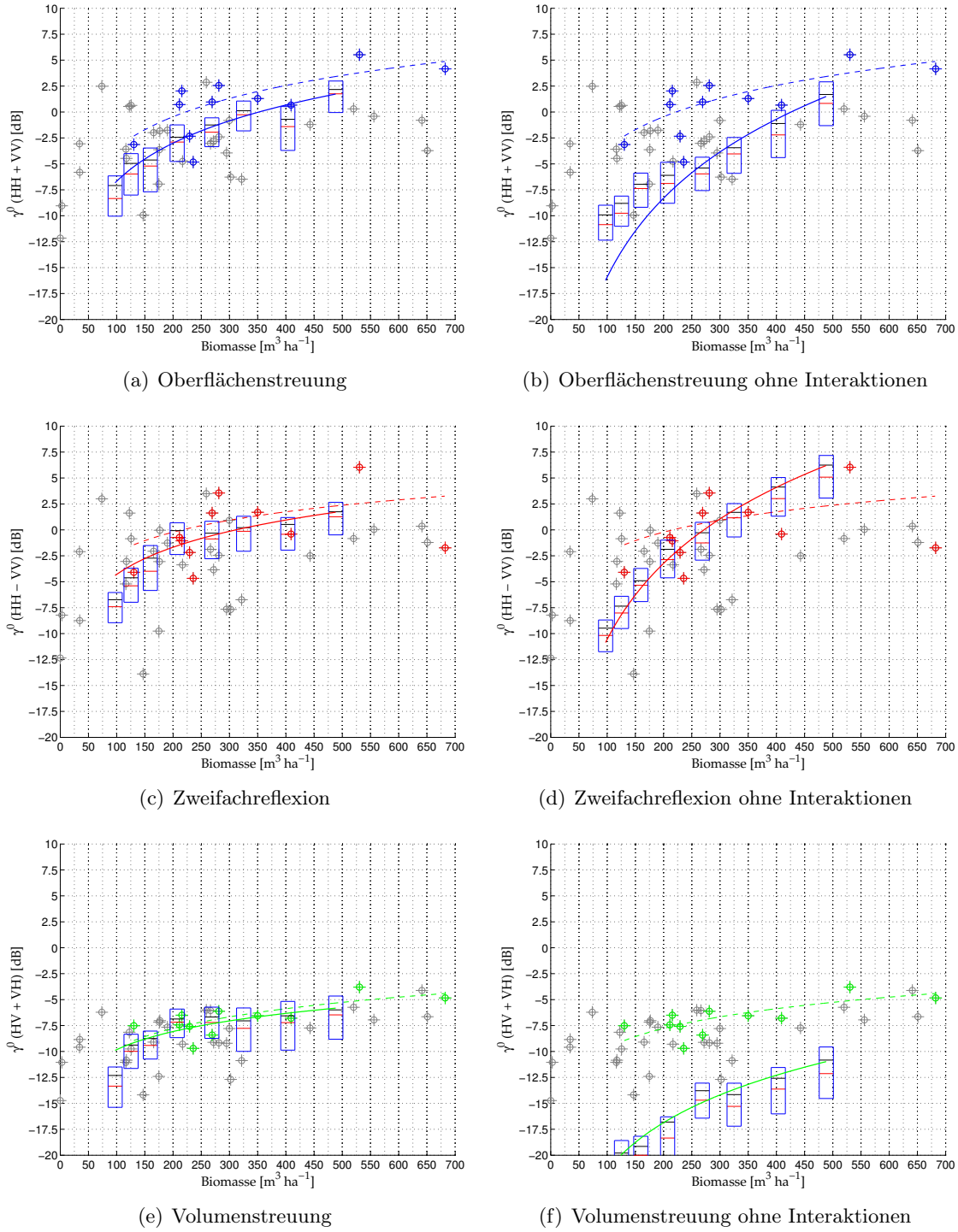


ABB. 3.61: Simulation im Vergleich zu den E-SAR P-Band-Daten aus dem Testgebiet *Hinwil*. Graue Symbole: alle Stichproben aus dem Testgebiet *Hinwil*, farbige Symbole: ausgewählte Stichproben mit Bedeckungsgrad > 40%.

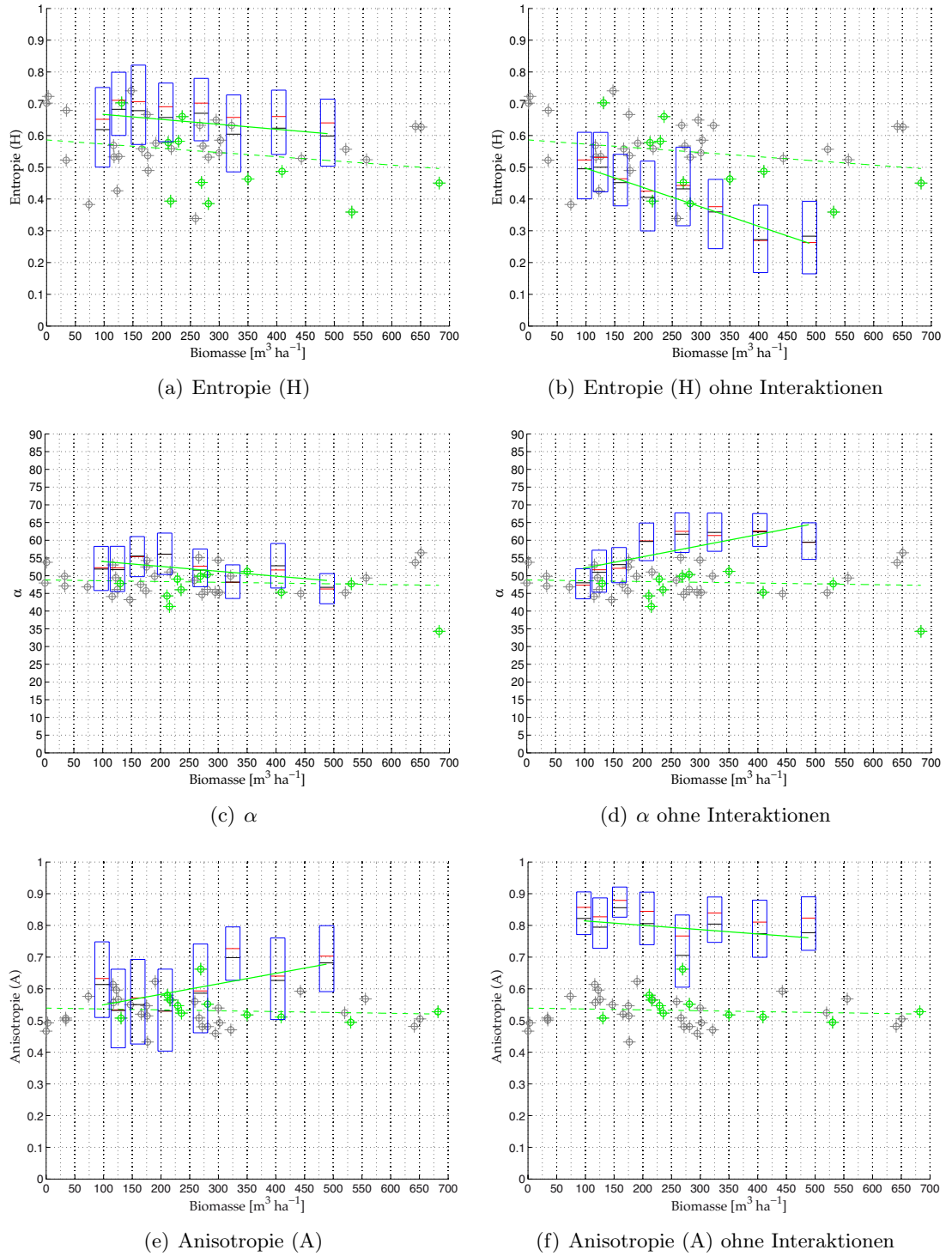


ABB. 3.62: Simulation im Vergleich zu den E-SAR P-Band-Daten aus dem Testgebiet *Hinwil*, inkohärente Dekomposition nach Cloude. Graue Symbole: alle Stichproben aus dem Testgebiet *Hinwil*, farbige Symbole: ausgewählte Stichproben mit Bedeckungsgrad $> 40\%$.

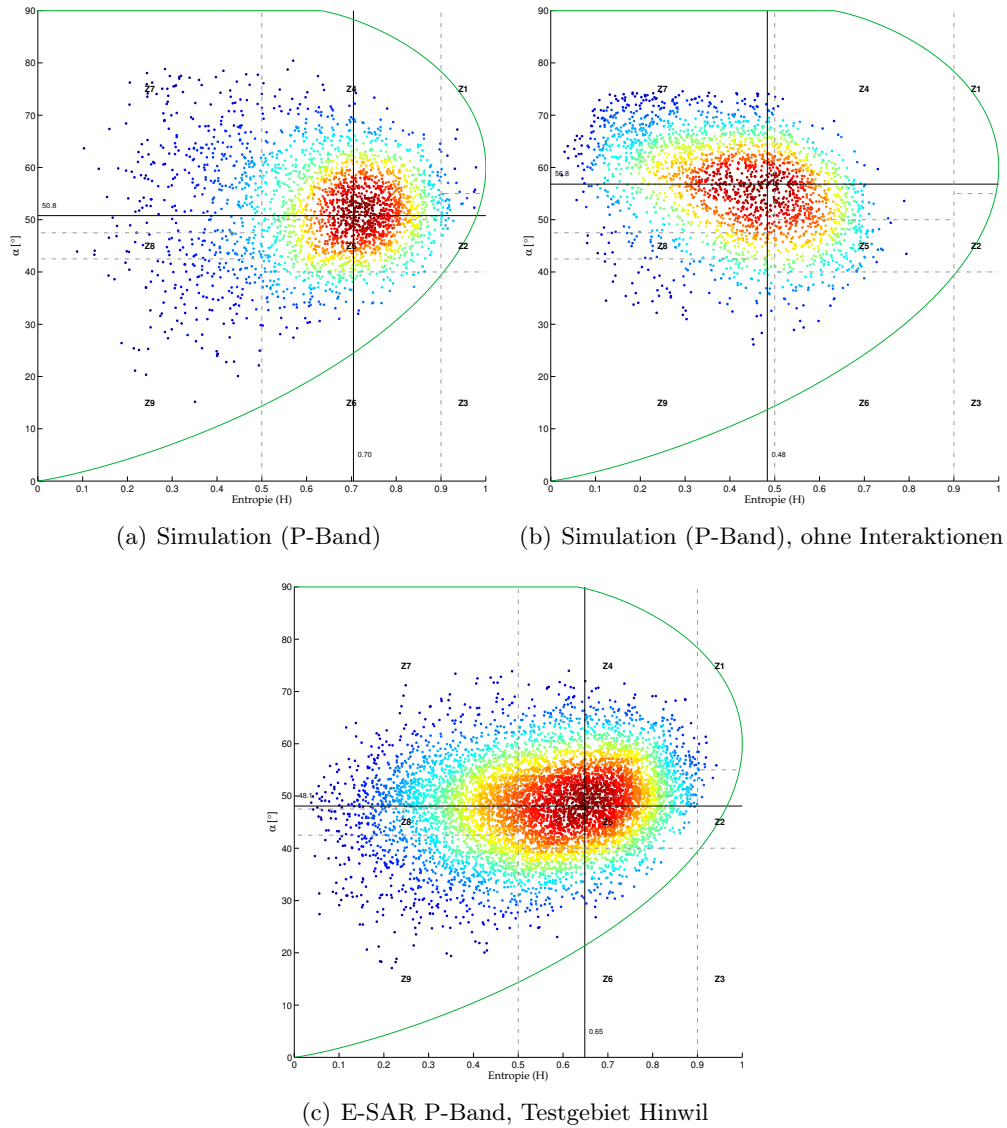


ABB. 3.63: (a) Simulation in der Entropie- α -Ebene, alle simulierten Waldbestände, (b) Simulation ohne Interaktionen, (c) alle E-SAR-Stichproben des Testgebietes Hinwil, Referenztrack.

Testgebiet Krycklan

Für das Testgebiet Krycklan wurden zwei einzelne Ausdünnungslinien mit verschiedenen Startwerten simuliert. Der Ausdünnungsparameter d wurde so gewählt, dass er den im Testgebiet Krycklan gefundenen Werten entspricht. Für Einzelbäume mit tiefer Biomasse wurde $d = 0.7$ gewählt, für Biomassereichere Bäume $d = 0.9$. Die Parametrisierung wird in TAB. 3.31 gezeigt. Die Resultate in ABB. 3.65 zeigen die simulierten Stichproben im Vergleich mit den Stichproben aus dem Testgebiet t01, Krycklan. Die gewählte Parametrisierung führt zu einer guten Über-

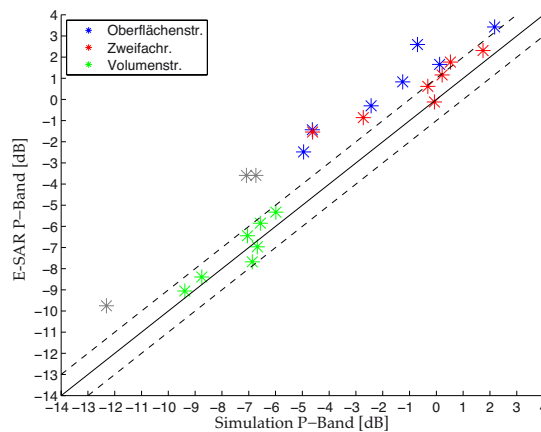


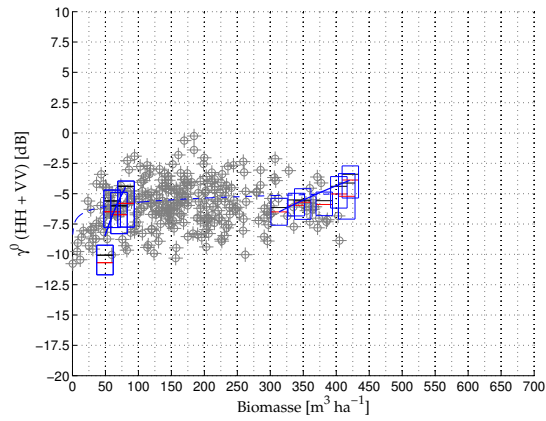
ABB. 3.64: Vergleich Simulation und E-SAR-P-Band, Testgebiet *Hinwil*.

einstimmung mit den gemessenen Werten. Der Wertebereich der Stichproben des Testgebietes wird erfasst. Weiter zeigt die Simulation den charakteristischen Verlauf der Ausdünnungslinien. Die zweite Ausdünnungslinie zeigt den erwarteten konstanten Verlauf in der Volumenstreuung und in der Zweifachreflexion, die erste Ausdünnungslinie weist eine positive Steigung in allen Streumechanismen auf. Dies stimmt mit den Schlussfolgerungen in KAPITEL 3.7 überein.

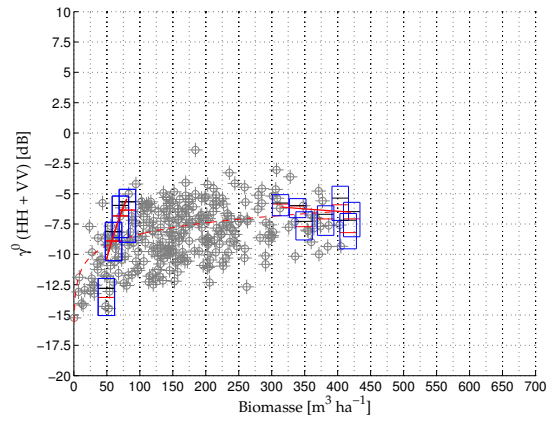
Parameter	1. Ausdünnungslinie	2. Ausdünnungslinie
Holzfeuchtigkeit	40%	
ϵ_r Holz	$\epsilon_{ } : 9.703 + 1.778i, \epsilon_{\perp} : 6.469 + 1.078i$	
Bodenrauigkeit	0.3 m	
Baumalter	12y bis 18y in 2y-Schritten	16y bis 28y in 2y-Schritten
Baumabstände	3.98 m bis 6.56 m	2.75 m bis 6.29 m
Ausdünnungsparameter	0.7	0.9
Standardabweichung	$0.2 \times \text{Baumabstand}$	
ϵ_r Boden	$5.5 + 1.5i$	
<i>off nadir</i> -Winkel	56°	

TAB. 3.31: Parameter für die Simulation des Testgebietes *Krycklan*.

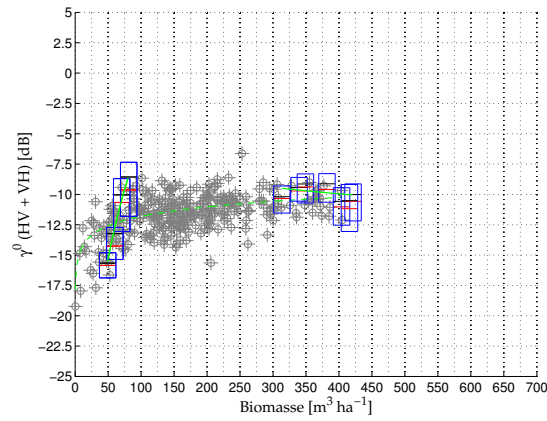
Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, mit der gezeigten Methodik naturnahe simulierte Daten zu erhalten, die auf nachvollziehbare Parametrisierungen zurückzuführen sind. Ausserdem zeigt die Simulation bezüglich Vegetationsstruktur und Ausdünnung dieselben Reaktionen wie die untersuchten Wälder.



(a) Oberflächenstreuung



(b) Zweifachreflexion



(c) Volumenstreuung

ABB. 3.65: Simulation (farbige Balken) im Vergleich zu den Daten aus dem Testgebiet *Krycklan* (graue Symbole).

3.10.3 Vergleich mit bestehenden Simulationsresultaten

Im Folgenden wird gezeigt, dass das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsverfahren eine Verbesserung der Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Daten gegenüber bestehenden Modellen bringt.

In ABB. 3.66 wird die Simulation eines Mangrovenwaldes im P-Band mit dem Streumodell nach Thirion et al. [Thirion 06] wiedergegeben. Das dort angewendete Streumodell erfasst die kopolaren Mechanismen gut, aber die kreuzpolare Rückstreuung (Volumenstreuung) wird um ~ 7 dB unterschätzt. Diese Abweichung kann nachvollzogen werden, indem in der DDA die Interaktionen unterdrückt werden, was in ABB. 3.61 gezeigt wird. Das Modell nach [Thirion 06] berücksichtigt Interaktionen, allerdings nur bis zur ersten Ordnung. Im Gegensatz dazu hat die DDA keine Limitierung der berücksichtigten Interaktionen.

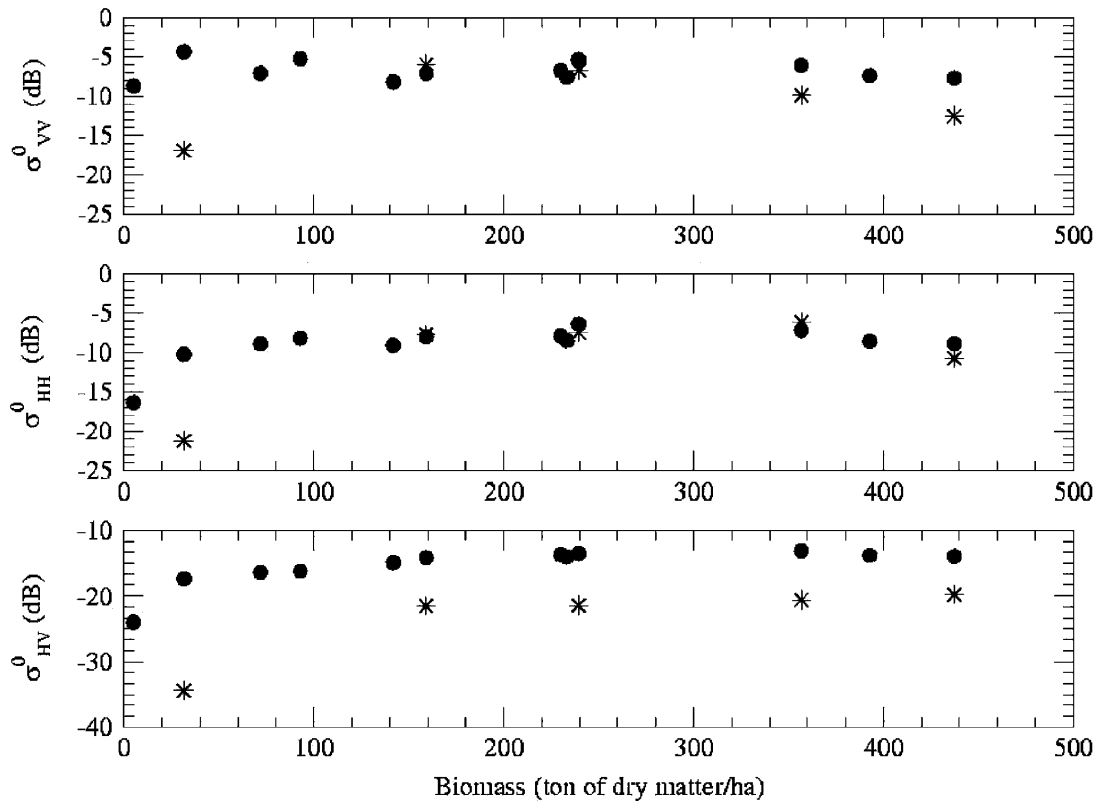


ABB. 3.66: Simulationsergebnisse nach Thirion et al. [Thirion 06]. Simuliert wurde ein Mangrovenwald im P-Band (Asterisken) und der Messung gegenübergestellt (Punkte). Deutlich wird, dass das präsentierte Streumodell die kreuzpolare Streuung um ~ 7 dB unterschätzt, während die kopolaren Mechanismen besser übereinstimmen.

In ABB. 3.67 sind die Simulationsergebnisse aus [Praks 03] in der Entropie- α -Ebene gezeigt. Dies ermöglicht, nicht nur die Rückstreustärke, sondern auch den Zusammenhang der Streume-

chanismen und deren Verteilung zu beurteilen. In [Praks 03] wurde ein strukturell komplexes Baummodell simuliert, die Entropie wurde in der Modellierung deutlich unterschätzt. Im Gegensatz dazu kann die DDA die Streumechanismen eines komplexen Baummodells naturnah wiedergeben, was in ABB. 3.63 gezeigt wird. Diese Beurteilung ist aus der Rückstreustärke alleine nicht möglich. In [Praks 03] waren die Rückstreuintensitäten zufriedenstellend simuliert worden.

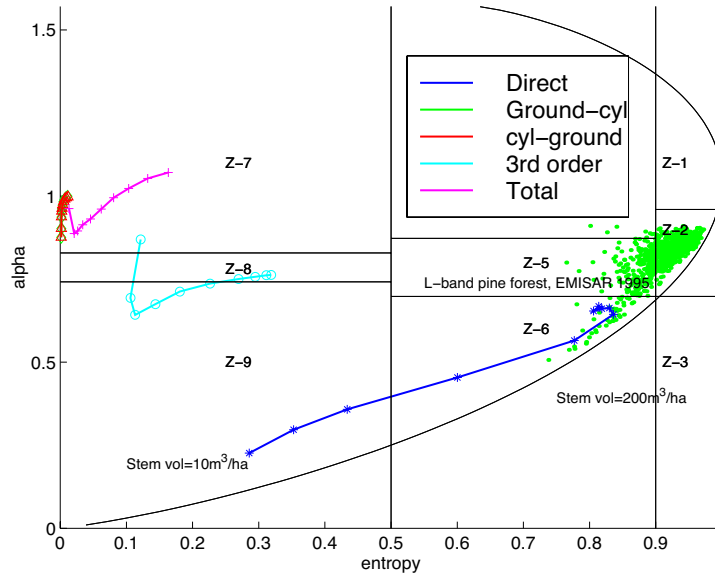


ABB. 3.67: Simulationsergebnisse nach Praks et al. aus [Praks 03]. Simuliert wird ein strukturell komplexes Baummodell in unterschiedlich dichter Anordnung im L-Band. Deutlich wird, dass das präsentierte Streumodell die Entropie gegenüber der Messung (grüne Punkte) deutlich unterschätzt.

Die PolSarPro-Software [Pottier 11] beinhaltet einen Simulator für einfache Baummodelle. Der Simulationsansatz beruht auf der geometrischen Optik. Die Rückstreuungen von Primitivobjekten (Zylinder, Kegel, Kugeln, Scheiben) werden kohärent addiert. In ABB. 3.68 werden Resultate der PolSarPro-Simulationssoftware gezeigt. Die Darstellung in der Entropie- α -Ebene 3.68(b) zeigt ein realistisches Bild der Streumechanismen. Im Vergleich zu den untersuchten Wäldern (vgl. KAPITEL 3.5) wird aber deutlich, dass das Modell einen hohen Anteil von tiefen α -Werten (Oberflächenstreuung) zeigt. Wenn die Streumechanismen miteinander in ABB. 3.68(a) verglichen werden, können die tiefen Werte erklärt werden, da die Zweifachreflexion schwächer ausfällt als die Volumenstreuung. Dies entspricht nicht den in den realen Daten gefundenen Charakteristiken von Waldgebieten, da die Volumenstreuung im P-Band üblicherweise den schwächsten Mechanismus darstellt. Die Rückstreuungen der einzelnen Mechanismen liegen im Vergleich zu natürlichen Waldgebieten sehr nahe beieinander, der Unterschied zwischen stärkstem und

schwächstem Mechanismus beträgt lediglich 5.3 dB. In natürlichen Wäldern werden aber typischerweise Unterschiede von bis zu 10 dB zwischen Volumenstreuung und Oberflächenstreuung beobachtet.

Zum insgesamt betreffend Grössenordnung der geschätzten Dekompositionsparametern realistischen, aber bei genaueren Betrachtung unnatürlichen Resultat bezüglich der relativen Stärken der Streumechanismen trägt eventuell das stark abstrahierte Baummodell der PolSARPro Software bei.

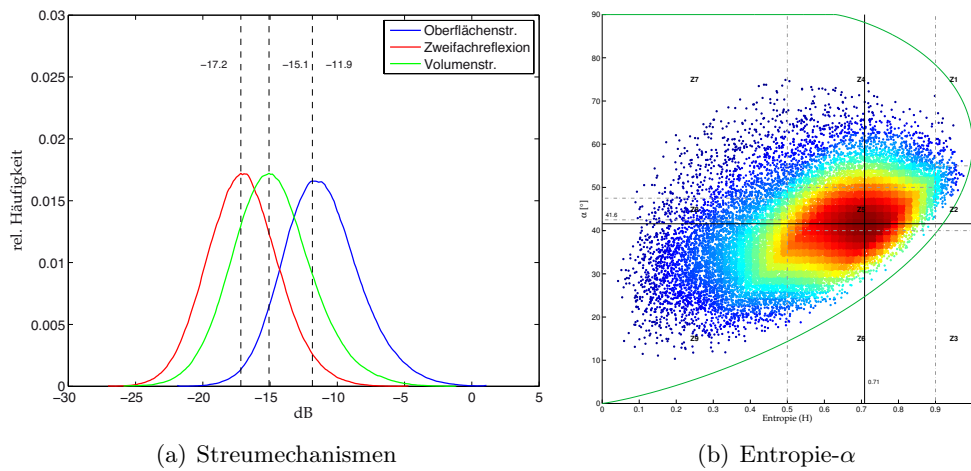


ABB. 3.68: Resultate PolSARPro Simulator. Simulierte Frequenz: 433 MHz, 550 Stämme pro Hektare, Baumhöhe 7 m, Laubbaum-Modell, entspricht *example 4* gemäss [Pottier 11].

In ABB. 3.69 wird das Simulationsresultat nach [Disney 06] gezeigt, das auf demselben Baummodell aufbaut wie die Simulationen in dieser Arbeit. Es wird deutlich, dass das naturnahe Baummodell alleine nicht ausreicht, um eine maximale Übereinstimmung mit natürlichen Daten zu erreichen. In [Disney 06] wurde mit demselben Baummodell, das in dieser Arbeit Verwendung findet, die Rückstreuung höherer Einzelbaumbiomassen überschätzt, während die Rückstreuung kleinerer unterschätzt wurde. Durch die Integration der Ausdünnung in die Baumpositionierung konnte dieses Verhalten korrigiert werden, was in Kapitel 3.10.2 gezeigt wurde.

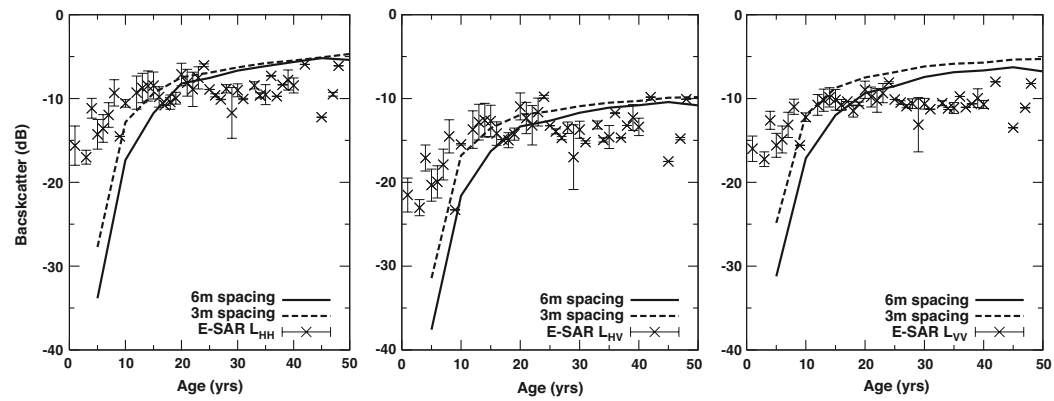


ABB. 3.69: Simulationsergebnisse nach Disney et al. aus [Disney 06]. Für die Simulation wurde dasselbe Baummodell wie in dieser Arbeit verwendet, im Unterschied aber wurden L-Band-Daten betrachtet. Deutlich wird die Abnahme der Übereinstimmung für hohe und tiefe Biomassen in allen Kanälen.

4 Synthese

Die Synopsis greift die wichtigsten Ergebnisse auf und setzt sie in Beziehung mit der Literatur. Daraus folgt die Beantwortung der Fragestellung. Die Arbeit schliesst mit einem Ausblick auf weitere Forschungsfragen, die sich im Verlauf der Arbeit gestellt haben.

4.1 Synopsis

Eine Übersicht über die in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit ihren wichtigsten Ergebnissen bietet folgende Auflistung:

1. Anhand von verschiedenen Testgebieten wurde der Zusammenhang zwischen Biomasse und Rückstreuung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Zusammenhang durch die Einzelbaumstruktur sowie durch die Struktur des Waldbestandes beeinflusst wird. Mit der Ausdünnung, d.h. der Reduktion der Baumanzahl für zunehmende Einzelbaumbiomassen, konnten die zwischen den Testgebieten beobachteten Unterschiede des Zusammenhangs zwischen Biomasse und Rückstreuung erklärt werden.
2. Ein *full wave*-Streumodell basierend auf der *discrete dipole approximation (DDA)* wurde entwickelt, das in Verbindung mit einem strukturell komplexen Baummodell die Modellierung von simulierten *SAR*-Rückstreuwerten ermöglicht. Dazu musste die Formulierung an frequenzmodulierte Signale angepasst werden. Weiter musste das Baummodell unter Beibehaltung der relevanten Strukturinformation so vereinfacht werden, dass eine Berechnung mit realistischem Rechenaufwand möglich wurde. Eine weitere Reduktion des Rechenaufwandes wurde durch die Simulation von teilfokussierten Daten erreicht.
3. Die Struktureffekte sowie der gemessene Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse konnten in simulierten Daten mit hoher Übereinstimmung nachvollzogen werden, indem realitätsnahe Parametrisierungen verwendet wurden.

Diese Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten detaillierter erläutert und mit der Literatur in Zusammenhang gebracht.

4.1.1 Stabilität der Messung, räumliche Skala

In [Sandberg 11] wurde eine hohe zeitliche Stabilität der Messung zwischen verschiedenen Aufnahmedaten festgestellt. Der dort untersuchte Datensatz der BioSAR-1-Kampagne [Hajnsek 08] umfasste zeitlich versetzte Aufnahmen entlang des identischen Flugpfades und räumlich verschobene Fluglinien mit identischer Blickrichtung.

In Ergänzung zu dieser Feststellung konnte in dieser Arbeit bestätigt werden, dass die untersuchten P-Band-Daten dann in räumlicher Hinsicht stabil sind, wenn die Fluggeometrie übereinstimmt. Im Testgebiet Krycklan unterschieden sich die Aufnahmen mit identischer Fluglinie um weniger als ± 1 dB. Die Abweichungen überstiegen den Wert von ± 1 dB, wenn wie im Testgebiet Hinwil Fluglinien verglichen wurden, die um grosse horizontale oder vertikale Basislinien voneinander getrennt waren. Die grössten Abweichungen wurden im Testgebiet Krycklan festgestellt, in welchem Fluglinien mit unterschiedlicher Blickrichtung miteinander verglichen wurden. Aus diesen Arbeiten folgt, dass die Stabilität von P-Band-Rückstreuwerten bezogen auf Biomasseschätzungen nur dann gegeben ist, wenn identische Fluggeometrien miteinander verglichen werden.

Es wurde festgestellt, dass die Qualität der Koregistrierung die Stabilität negativ beeinflussen kann. Das in der DLR-Prozessierung für die Koregistrierung verwendete *resampling* führt im Testgebiet Hinwil zu deutlichen Abweichungen der koregistrierten Fluglinien vom *master track*, vgl. 3.5.3.

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten wurde in dieser Arbeit bewusst die Stichprobe (*plot*) als kleinste räumliche Einheit gewählt und nicht der Bestand (*stand*). Auch mit diesen kleinskaligen Bezugsflächen sind aussagekräftige Resultate möglich, insbesondere wenn Strukturmerkmale untersucht werden. Es konnte insbesondere gezeigt werden, dass Ausdünnungsparameter, Schichtung und Kronenlänge auch zwischen Stichproben (*plots*) desselben Bestandes stark variieren und zu deutlichen Abweichungen des Rückstreuwertes der Stichprobe führen können. Diese Abweichungen werden durch die Mittelung mehrerer Bestände reduziert: mit dem Bestand als Bezugsgrösse kann eine Biomasseinversion mit deutlich geringeren Fehlern durchgeführt werden, wie die Arbeiten [Sandberg 11], [Hajnsek 09] und [Le Toan 11] zeigen. Wenn die Strukturparameter für alle Stichproben vorliegen, ist es vorzuziehen, die Struktureinflüsse auf der Basis der Einzelstichproben zu korrigieren. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Abweichungen durch dieses Korrekturverfahren stark reduzieren lassen, ohne dass die räumliche Auflösung geschmälert werden muss.

4.1.2 Die Waldstruktur

Einzelbaumstruktur

In Ergänzung zu [Watanabe 06] wurde hier gezeigt, dass die Rückstreuung tatsächlich durch unterschiedliche Strukturen des Biomassevolumens beeinflusst wird. Diese Strukturunterschiede sind nicht durch die Baumspezies begründet, sondern vor allem durch die Kronenlänge (Zweifachreflexion) bzw. die Schichtung des Volumens (Oberflächenstreuung und Volumenstreuung). Diese Parameter werden im Rahmen des Forstinventars des Kantons Zürich [Bau09] standardmässig erhoben; vergleichbare Parameter können aber aus Daten zum Ast- und Stammvolumen sowie der Baumhöhe abgeleitet werden, was in dieser Arbeit gezeigt wird. Die in [Watanabe 06] festgestellte Abhängigkeit der Rückstreuung von der Beleuchtungsrichtung auf Grund der linearen Aufforstung wurde auf Grund von fehlenden Einzelbaumpositionen im Testgebiet Krycklan nicht untersucht. Die Einzelbaumpositionen im Testgebiet Hinwil zeigten keine regelmässige Reihenstruktur. Dennoch konnte vor allem im Testgebiet Krycklan eine starke Abhängigkeit der Rückstreuung von der Beleuchtungsrichtung (Azimut-Aspektwinkel) festgestellt werden, die zu einer Streuung in der Grössenordnung von ± 2 dB führte. Gegen einen dominanten Effekt der Pflanzstruktur spricht, dass auch für wiederholte Aufnahmen aus derselben Blickrichtung eine Streuung von ± 1 dB beobachtet wurde.

Imhoff et al. [Imhoff 95a] stellten fest, dass die Rückstreuung mit einer Metrik, die das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen als Parameter verwendet, exakter beschrieben werden kann als durch die Gesamtbiomasse alleine. Es wurde festgestellt, dass ein hohes Oberflächen zu Volumenverhältnis die Rückstreuung reduziert. Dieses Konzept kann in dieser Arbeit einerseits bestätigt werden, indem die gefundene Abhängigkeit von Kronenlänge und Schichtung eine ursächliche Erklärung für die Reduktion der Rückstreuung liefert. Andererseits präzisiert die Integration der Ausdünnung in die Erklärung der Rückstreuung diese Betrachtung. Die Rückstreuung ist nicht nur von der Struktur des Einzelbaumes abhängig, sie variiert auch (bei identischer Biomasse) auf Grund verschiedener Ausdünnung zwischen identisch strukturierten, aber unterschiedlich voluminösen und somit unterschiedlich dicht stehenden Einzelbäumen.

In [Neumann 12] wurde eine hohe Korrelation der Zweifachreflexion und eine sehr tiefe der Oberflächenstreuung mit der Biomasse im Testgebiet Krycklan festgestellt. Dies wurde auch in dieser Arbeit gezeigt. Zusätzlich ist es hier gelungen, durch die Schätzung der Ausdünnungsparameter im Testgebiet Krycklan diese fehlende Korrelation zu erklären. Die Ausdünnungsparameter

liegen nahe bei der Einzelbaumrückstreuung der Oberflächenstreuung. Die tiefe Korrelation der Oberflächenstreuung ist eine direkte Folge von dieser Nähe der beiden Koeffizienten. Im Testgebiet Hinwil weist die Zweifachreflexion eine tiefere Korrelation auf als die Oberflächenstreuung. Der tiefere Wert des Ausdünnungsparameters im Testgebiet Hinwil liegt nahe beim Einzelbaumrückstreuungskoeffizienten der Zweifachreflexion. Somit kann die tiefe Korrelation auch in der Zweifachreflexion dadurch erklärt werden, dass die beiden Koeffizienten nahe beieinander liegen.

Das Verhältnis zwischen HH und VV korreliert mit der Biomasse, was in [Soja 13], [Neumann 12] und [Ulander 11b] gezeigt wurde. In [Neumann 12] wurde explizit eine tiefere Korrelation zwischen dem VV-Kanal und Biomasse festgestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit simulierten Einzelbaumreflexionen r zeigten dasselbe Verhalten. Die Reflexion im VV-Kanal verhält sich für grössere Bäume annähernd optisch, ist also abhängig von der Oberfläche des Streuers, während die Rückstreuung in HH den grössten Exponenten aufweist und eher im Zusammenhang steht mit dem Streuvolumen. Dieser Unterschied erklärt die beobachtete geringere Korrelation im VV-Kanal und die hohe Korrelation des Verhältnisses HH/VV mit der Biomasse. Aus methodischer Sicht ist dieses Verhältnis demnach ein erfolgversprechender Parameter, da er direkt mit der Einzelbaumstruktur in Verbindung gebracht werden kann. [Soja 13] zeigt, dass das Verhältnis zwischen dem HH- und VV-Kanal durch die Geländeneigung beeinflusst wird. Diese Abhängigkeit bedarf einer ursächlichen Erklärung, es ist nicht nachvollziehbar, weshalb der absolute Wert der Neigung (zum Sensor hin oder vom Sensor weg gerichtet) sich in gleicher Weise durch eine Reduktion des Verhältnisses zeigen sollte.

Die in [Brolly 12a] als theoretische Überlegung formulierte Änderung der Rückstreucharakteristik auf Grund des Übergangs der Streuerdimension von der Rayleigh-Region in die Mie- oder optische Region konnten anhand der SAR-Daten gezeigt werden. Die Grössenordnung der Mie-Oszillationen konnte beziffert werden; die Streuung durch die Oszillationen hat das erwartete Signal durch die Biomasseänderung übertroffen. Die Mie-Oszillationen treten vor allem in der Volumenstreuung in Erscheinung. In den anderen Streumechanismen liegen die typischen relevanten Streuerdimensionen schon ausserhalb der Oszillationsregion, vgl. KAPITEL 3.4.3.

Auch Neumann et al. stellen in [Neumann 12] einen problematischen Einfluss der Topographie fest: «*A strong limiting factor was the incidence angle and topography dependence of polarimetry and backscatter intensity.*». Diese Formulierung kann hier nicht bestätigt werden. Die radiometrische γ^0 -Normierung (die durch Neumann et al. nicht vorgenommen wurde) korrigierte die Einfallswinkelabhängigkeit zufriedenstellend. Eine starke Abhängigkeit war nach dieser Nor-

mierung nicht mehr zu erkennen. Allerdings hat sich gezeigt, dass für die Daten des Testgebietes Krycklan die σ^0 -Normierung die Winkelabhängigkeit der Zweifachreflexion oder des HH-Kanals besser korrigiert. Dies führte zur Schlussfolgerung, dass eine topographiebasierte radiometrische Normierung zwingend notwendig ist für eine verlässliche Schätzung, und dass zugelassen werden sollte, diese Normierung für unterschiedliche Kanäle oder Mechanismen unterschiedlich durchzuführen.

Bestandesstruktur

Das Ausdünnungs-Konzept nach Woodhouse und Brolly et al. [Woodhouse 06], [Brolly 10] und [Brolly 12b] konnte in dieser Arbeit in beiden Testgebieten dazu verwendet werden, um einerseits die gemessene Rückstreuung, aber andererseits auch die starken Unterschiede zwischen den beiden Testgebieten zu erklären. Die entwickelten Verfahren zur Schätzung der Ausdünnungsparameter ermöglichen in allen untersuchten Testgebieten eine plausible Schätzung der Ausdünnung. Die Ausdünnung im borealen Wald im Testgebiet Krycklan fällt deutlich höher aus als im temperierten (Testgebiet Hinwil) und im Testgebiet Remningstorp, welches in der Rückstreucharakteristik vergleichbar ist mit dem Testgebiet Hinwil. Ein möglicher Mechanismus wäre, dass, bedingt durch die kurze Vegetationszeit, Wälder in nördlichen Breiten vermehrt Stressfaktoren ausgesetzt sind und darauf mit einer verstärkten Ausdünnung reagieren. Im Gegensatz zu den Nadelwäldern in der gemässigten Zone, wo das Klima für diesen Vegetationstyp eigentlich zu warm ist (die potentiell natürliche Vegetation im Testgebiet Hinwil z. B. wäre ein Laubwald (Buchenwald) oder Laubmischwald). Möglicherweise unterscheidet sich aber auch die Bewirtschaftungsform zwischen den Testgebieten.

Die Oberflächenstreuung und die Zweifachreflexion scheinen im Vergleich der Testgebiete ihre Rolle zu tauschen. Im Testgebiet Hinwil zeigt die Oberflächenstreuung eine deutliche Korrelation mit der Biomasse, während die Zweifachreflexion damit nicht korreliert, im Testgebiet Krycklan ist die Feststellung genau entgegengesetzt. Mit der Ausdünnung kann dieses Verhalten erklärt werden. Im Testgebiet Hinwil liegt der Ausdünnungskoeffizient am nächsten bei der Einzelbaumrückstreuung der Zweifachreflexion, was die Korrelation zwischen Zweifachreflexion und Biomasse schmälert. Im Testgebiet Krycklan liegt der Ausdünnungskoeffizient hoch und somit nahe bei allen Einzelbaumreflexionen. Ausserdem variiert der Ausdünnungskoeffizient kleinräumig. Beides führt zu einer hohen Variabilität der Rückstreuung. Durch die zufällige Beprobung der Ausdünnungslinien in den einzelnen Beständen können annähernd beliebige Zusammenhänge

zwischen Rückstreuung und Biomasse auftreten, was die starke Variabilität der Korrelation in den einzelnen Beständen erklärt. In der Gesamtheit aller Bestände zeigt sich das gemessene Resultat, das aber einen hohen Grad an Zufälligkeit aufweist, wie die Aufteilung der Daten in einzelne Ausdünnungslinien verdeutlicht. Werden die einzelnen Ausdünnungslinien verfolgt, so zeigen sie je nach Streumechanismus eine deutlich positive Steigung für die Oberflächenstreuung, eine geringe Steigung für die Zweifachreflexion und eine negative Steigung für die Volumenstreuung. Das entspricht einem Ausdünnungskoeffizienten, der höher liegt als die Einzelbaumrückstreuung der Volumenstreuung, aber tiefer als die Einzelbaumrückstreuungen der kopolaren Streumechanismen. Mit diesen Resultaten können demnach die gemessenen Korrelationen ursächlich erklärt werden. In Fällen tiefer Ausdünnung wie im Testgebiet Hinwil ist sogar eine numerische Voraussage der gemessenen Korrelationen möglich, was bedeutet, dass die grundlegenden Mechanismen korrekt erfasst wurden.

Die Hypothese, dass im Testgebiet Krycklan Ausdünnungslinien mit stark variabler Steigung zu einem in hohem Mass zufälligen Korrelationswert zwischen Biomasse und Rückstreuung führen, wird durch die Analyse der Parameter der inkohärenten Dekomposition bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass alle drei untersuchten Parameter Entropie, α -Winkel und Anisotropie in erster Linie von der Baumanzahl abhängen und somit ebenfalls von der Ausdünnung betroffen sind. Hohe α -Werte sind charakteristisch für den Anfang der Ausdünnungslinie, wo die Baumanzahl hoch ist. Tiefe Werte markieren eine fortgeschrittene Position in der Ausdünnungslinie. Die Entropie folgt dem Verlauf des α -Parameters, die Anisotropie ist negativ korreliert. Die Rückstreuung folgt in allen drei Mechanismen prinzipiell den Ausdünnungslinien, wobei die Volumenstreuung beim gefundenen hohen Ausdünnungsparameter abnimmt und in den anderen beiden Mechanismen zunimmt. Dies wurde dadurch bestätigt, dass die Fehlschätzung der Biomasse aus den Rückstreuwerten der Volumenstreuung eine deutliche Korrelation mit den trendbereinigten Parameterwerten der inkohärenten Dekomposition zeigt, wobei der α -Wert am stärksten korreliert. Das Muster der Fehler stimmt mit dem Muster der trendbereinigten Dekompositionsparameter überein.

In [Neumann 12] ist eine hohe Korrelation des α -Winkels mit der Biomasse belegt, was durch die Resultate in dieser Arbeit nachvollzogen werden konnte. Im Testgebiet Hinwil jedoch ist die Korrelation zwischen α -Parameter und Biomasse äusserst gering. Dieser anscheinende Widerspruch lässt sich wieder mit der Ausdünnung erklären. Eine Annahme ist, dass sich im

Testgebiet Hinwil die Baumanzahl in dem Mass reduziert, dass der mittlere Streumechanismus konstant bleibt.

Weitere Einflussfaktoren

Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zeigt, dass eine geringe Bodenreflektivität in der Simulation die Rückstreuung im Testgebiet Krycklan besser wiedergibt als ein stark spiegelnder Boden. Diese Feststellung kann nicht einfach mit der Unzulänglichkeit der Simulation erklärt werden. Ein erstes Argument gegen die Dominanz der Bodeninteraktion im borealen Nadelwald ist, dass die Volumenstreuung am stärksten mit der Biomasse korreliert. Es ist nicht konsistent, eine starke Korrelation mit dem Vegetationsvolumen zu akzeptieren und gleichzeitig eine dominante Rückstreuung in Zweifachreflexion und Oberflächenstreuung mit Bodeninteraktionen anzunehmen. Die korrelierende Volumenstreuung deutet darauf hin, dass ein hoher Anteil der eingestrahnten Energie bereits im Vegetationsvolumen rückgestreut wird. Eine dominante Rückstreuung in Zweifachreflexion und Oberflächenstreuung mit Bodeninteraktionen setzt aber eine ungestörte Penetration durch das Vegetationsvolumen und Interaktionen mit den Stämmen als dominanten Mechanismus voraus. Die Arbeit von Tebaldini et al. [Tebaldini 10] bestätigt für das Testgebiet Krycklan, dass die Streumechanismen in ähnlicher Höhe stattfinden. Allerdings verorten Tebaldini et al. auch die Volumenstreuung auf dem Bodenniveau. Somit wäre auch die Volumenstreuung als beeinflusst von der Reflexion am Boden anzunehmen. Dagegen spricht aber, dass die Reflexion an einer Fläche zu einer bevorzugten Reflexion der horizontalen Komponente führt, was die Volumenstreuung (d.h. kreuzpolare Streuung) wiederum reduziert. Auch wenn der tropische Regenwald nicht im geringsten mit borealen Wäldern vergleichbar ist, so zeigt doch die Untersuchung der tomographischen Daten in [Dinh 13], dass die Rückstreuung in HH, VV und HV in vergleichbarer Höhe und vor allem schon im höchsten Vegetations-*layer* stattfindet. Die wichtigste Schlussfolgerung, die auch auf boreale Wälder übertragen werden kann, ist, dass die Rückstreuung in HH und HV in der selben Penetrationstiefe auftritt.

In der Schätzung der Einzelbaumrückstreuung für Stichproben mit geringer Einzelbaumbiomasse wurde nicht wie vom Streutheorem gefordert ein höherer Exponent gefunden (Rayleigh-Annahme), sondern ein deutlich tieferer als für biomassereichere Bäume. Die Einzelbaumrückstreuung bewegt sich für alle Streumechanismen im optischen Bereich bei $r \sim 0.5$. Zusammen mit den oben erwähnten tomographischen Auswertungen führt das zu einer neuen Interpretation der Streumechanismen im borealen Wald. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass in diesen

Wäldern mit geringer Biomasse Bodeninteraktionen auftreten, was hier nicht angezweifelt wird. Wenn aber in dieser Situation der Boden selbst als Volumenstreuer in Erscheinung träte, könnte einerseits erklärt werden, warum in der Simulation eine tiefe Bodenreflektivität notwendig ist, die Einzelbaumrückstreuung zu tief bzw. in der optischen Region geschätzt wird und Tebaldini et al. die Volumenstreuung auf Bodenhöhe verorten. Zur Volumenstreuung vom Boden würde die auf dem Foto in ABB. 3.59 gezeigte Bodenstruktur passen. Die Aufnahme zeigt eine höckerige Bodenstruktur, die typisch ist für Moorböden (Taigaböden). Dieser Bodentyp könnte, vor allem im trockenen Zustand, auf Grund seiner Rauigkeit und seiner typischen Vegetationsbedeckung (z. B. Moose) durchaus im P-Band einen Volumenstreuer darstellen.

Die Bodenfeuchte wurde im Testgebiet Krycklan für ausgewählte Bestände erhoben. Es konnte in dieser Arbeit auf Grund fehlender Variabilität der Bodenfeuchtwerte keine verlässliche Abschätzung des Einflusses vorgenommen werden.

4.1.3 Simulation

Es wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass ein auf Maxwell-Gleichungen basiertes *full wave*-Streumodell so angepasst werden kann, dass basierend auf realistischen Parameterannahmen gut mit *SAR*-Messungen übereinstimmende Simulationsergebnisse erzielt werden können. Für die Simulation wurde ein architektonisches Baummodell verwendet, das den bisher in der Literatur [Israelsson 00] [Nguyen 06] in *full wave*-Modellen verwendeten an Komplexität weit überlegen ist. Es konnte gezeigt werden, dass unter Beibehaltung der grundlegenden exakten Formulierung des Streuproblems mit wenig einschränkenden Annahmen (teilweise fokussierte Daten) der Rechenaufwand auf ein Mass sinkt, das es erlaubt, komplexe Waldbestände zu simulieren. Mit auf der exakten Lösung von Maxwell-Gleichungen basierenden *full wave*-Modellen ist das in dieser Komplexität nach Wissen des Verfassers in der Literatur vorher noch nicht gezeigt worden. Die durchgeführten Simulationen zeigten eine hohe Übereinstimmung mit den Messdaten des Testgebietes Hinwil. Wird das Modell so parametrisiert, dass die Volumenstreuung annähernd ohne Abweichung dargestellt wird, zeigt auch die Zweifachreflexion eine geringe Abweichung in der Größenordnung < 1 dB. Die Oberflächenstreuung zeigt eine leicht grössere Abweichung, was u. a. in der sehr vereinfachten Berücksichtigung des Bodens begründet werden konnte. Die Verläufe mit zunehmender Biomasse werden aber in allen Streumechanismen konsistent wiedergegeben.

Bezüglich der Simulation der Streumechanismen zeigt sich im Vergleich mit Praks et al. [Praks 03], dass das hier entwickelte Streumodell die Streumechanismen (charakterisiert durch

die Parameter der inkohärenten Dekomposition) realitätsnah wiedergibt. Während Praks eine deutliche Unterschätzung der Entropie feststellte (in den Resultaten wurden Entropiewerte $H < 0.2$ gezeigt), überschätzte das hier verwendete Modell die Entropie leicht (typische Werte $H > 0.6$), was für Waldgebiete immer noch im erwarteten Bereich liegt. Dieser Unterschied kann nicht durch das Baummodell erklärt werden, Praks et al. simulierten einen strukturell vergleichbar komplexen Einzelbaum. Der Unterschied liegt eher im grundlegenden Ansatz zur Lösung des Streuproblems begründet. Praks et al. berechnen die Streumatrizen einzelner Zylinder unter Berücksichtigung der Bodeninteraktionen, die anschliessend kohärent addiert werden. Interaktionen zwischen den Zylindern fehlten.

Verglichen mit den Resultaten von Thirion et al. in [Thirion 06] zeigt sich, dass das kohärente, aber auf Volumenzellen basierende Streumodell die Volumenstreuung deutlich unterschätzt. Mit der Berücksichtigung der Interaktion zwischen den Einzelstreuern kann diese Abweichung nicht erklärt werden, da auch das Modell nach Thirion et al. die Interaktionen zwischen Streuern berücksichtigt, allerdings nur bis zur ersten Ordnung. Die Unterschätzung der Volumenstreuung kann eine Folge der limitierten Betrachtung der Interaktionen sein oder des stark vereinfachten, auf Volumenzellen basierenden Baummodell, das in [Thirion 06] verwendet wird.

Dies führt zur Schlussfolgerung, dass die Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Streuern des Baummodells notwendig sind für eine realitätsnahe Simulation und vor allem für eine realistische Wiedergabe der Streumechanismen, die in den Parametern Entropie, α und Anisotropie ausgedrückt werden. Diese Interaktionen sollten möglichst vollständig berücksichtigt werden, wie das in der DDA möglich ist.

Gegenüber den Resultaten von Disney et al. [Disney 06], worin dasselbe komplexe Baummodell wie in dieser Arbeit in einem nicht auf Maxwell-Gleichungen basierten kohärenten Streumodell verwendet wird, zeigten die neuen Simulationen eine bessere Übereinstimmung mit den *in natura* erhobenen SAR-Daten, vor allem was den Verlauf entlang der zunehmenden Biomasse entspricht. Die Resultate in Disney et al. zeigten eine Unterschätzung für tiefe Biomassen und eher eine Überschätzung für hohe Biomassen. Die im Vergleich dazu verbesserte Übereinstimmung des hier entwickelten Modells muss nicht allein in der physikalisch exakteren Formulierung des Modells mit Berücksichtigung der Dipolinteraktionen liegen. Es ist auch möglich, dass die Resultate in Disney et al. eine höhere Übereinstimmung hätten, wenn Ausdünnungseffekte berücksichtigt worden wären; in der genannten Arbeit werden nur konstante Baumabstände simuliert. Dies ist eine weitere Schlussfolgerung bezüglich Modellierung: Für eine hohe Übereinstimmung mit den

natürlichen Daten sollte in der Simulation das natürliche Wachstumsverhalten so realitätsnah wie möglich nachgebildet werden.

4.2 Synthese und Schlussfolgerung

Die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Fragen werden hier beantwortet, indem die Resultate in kurzer Form dargestellt und zu einer schlüssigen Antwort verdichtet werden.

Welche biophysikalischen Parameter beeinflussen die Rückstreuung in den einzelnen Streumechanismen?

Es konnte gezeigt werden, dass die gemessene Rückstreuung in den drei Streumechanismen Volumenstreuung, Oberflächenstreuung und Zweifachreflexion grundsätzlich ähnlich auf die Gesamtbiomasse pro Fläche reagieren. Unterschiede im Verhalten der drei Streumechanismen sind auf folgende Parameter zurückzuführen:

- Eine deutliche Schichtung des Vegetationsvolumens führt zu einer Abschwächung der Oberflächenstreuung und Volumenstreuung.
- Einzelbäume mit langen Kronen weisen eine geringere Zweifachreflexion auf.
- Der Zusammenhang zwischen diesen Parametern und der Veränderung der Rückstreuung wurde mit einer einfachen linearen Regression korrigiert, was sich in einer Reduktion des verbleibenden Fehlers zeigt. Der Fehler konnte im Testgebiet Hinwil um typischerweise 40% reduziert werden auf einen Wert $\sim 80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sowohl für die Oberflächenstreuung als auch für die Volumenstreuung. Im Testgebiet Krycklan konnten die Fehler um 75% reduziert werden für die Streumechanismen Volumenstreuung und Zweifachreflexion. Die verbleibenden Fehler betragen $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ für die Volumenstreuung bzw. $\sim 300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ für die Zweifachreflexion.
- Die Einzelbaumrückstreuung wurde direkt aus den Messungen und mittels simulierter Daten geschätzt. Es hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Einzelbaumrückstreuungen für die unterschiedlichen Intensitätsverläufe in den Streumechanismen verantwortlich sind.
- Es konnte gezeigt werden, dass für kleine Bäume mit einer Biomasse $b < 0.6 \text{ m}^3$ Mie-Oszillationen auftreten können, welche die Streuung in der Messung erhöhen. Für Bestände mit höheren Einzelbaumbiomassen sind die Mie-Oszillationen nicht von Bedeutung.

-
- Die im Vergleich der Testgebiete festgestellte unterschiedliche Korrelation zwischen Streumechanismen und Biomasse muss keine Folge unterschiedlicher Einzelbaumrückstreuungen sein. Die Reflektivität der Einzelbäume ist als geometrische Eigenschaft zwischen Testgebieten prinzipiell gut vergleichbar für die Volumenstreuung und für die Oberflächenstreuung. Für die Zweifachreflexion bedarf die Einzelbaumreflexion weiterer Untersuchungen.

Kann die in allen Streumechanismen festgestellte Sättigung durch die Ausdünnung (thinning) erklärt werden?

Die Parametrisierung der drei Streumechanismen unterscheidet sich stark zwischen den verschiedenen Testgebieten. In allen Testgebieten konnte ein Ausdünnungskoeffizient geschätzt werden, der eine Voraussage des Zusammenhangs zwischen Rückstreuung und Biomasse ermöglicht. Die gemessenen Unterschiede können wie folgt mit der Ausdünnung begründet werden:

- Im Testgebiet Hinwil mit der geringeren Ausdünnung konnte der Ausdünnungskoeffizient mit verschiedenen Verfahren geschätzt werden. Diese Schätzungen wurden dazu genutzt, den gemessenen Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse numerisch vorherzusagen. Dies bestätigt die grundsätzliche Annahme, dass die Ausdünnung direkt die Messung beeinflusst.
- Im Testgebiet Krycklan konnte nachvollzogen werden, weshalb die gemessenen Korrelationswerte deutlich tiefer liegen als in anderen Testgebieten. Die Diversität der verschiedenen Ausdünnungslinien sowie die starken Schwankungen der Steigungen der Ausdünnungslinien, die dadurch begründet werden können, dass der Einzelbaumrückstreuungs-Parameter und Ausdünnungsparameter nahe beieinander liegen, lässt eine korrekte numerische Vorhersage der gemessenen Korrelation in Gebieten mit hoher Sättigung nicht zu. Die geringere Korrelation im Testgebiet Krycklan im Vergleich zum Testgebiet Hinwil kann daher ursächlich auf eine stärkere Ausdünnung (d.h. stärkere Reduktion der Baumanzahl bei Zunahme der Einzelbaumbiomasse) zurückgeführt werden. Die Stärke des festgestellten Zusammenhangs muss aber bis zu einem gewissen Grad als zufällig angesehen werden.
- Es konnte gezeigt werden, dass die Ausdünnung im Testgebiet Krycklan kleinräumig variiert. Dies führt zu einer weiteren Erhöhung der Streuung in den gemessenen Rückstreuwerten. Eine separate Behandlung der Stichproben anhand ihrer geschätzten Ausdünnung führte zu einer deutlichen Reduktion der Residuen. Der verbleibende Fehler reduzierte sich dadurch um 25% - 50%.

- Ein Zusammenhang zwischen Ausdünnung und dem Standortfaktor Exposition konnte nicht hergestellt werden.

Die Sättigung von *SAR*-Daten bei hoher Biomasse ist somit eindeutig auf das Wachstumsverhalten eines Baumbestandes zurückzuführen. Die Änderung des Streuverhaltens (Übergang von der Rayleigh-Region in die optische Region) ist nicht allein verantwortlich für die beobachtete Sättigung höherer Biomassen.

Können Dekompositionsparameter gefunden werden, aus denen neben der Biomasse weitere Vegetationsparameter abgeleitet werden können?

Die Parameter der inkohärenten Dekomposition nach Cloude stehen mit der Biomasse im Zusammenhang, was Neumann et al. [Neumann 12] zeigten, aber sie stehen auch im Zusammenhang mit der Baumanzahl pro Fläche:

- Das Muster der Fehler der Biomasseschätzung aus der gemessenen Rückstreuung korreliert mit dem Muster der Dekompositionsparameter. Die Korrelation ist am höchsten für α . Entropie und α weisen eine positive Korrelation mit dem Biomasse-Schätzfehler auf, die Anisotropie eine negative.
- Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Dekompositionsparameter es erlauben, eine Stichprobe auf einer Ausdünnungslinie zu verorten.
- Eine versuchte Korrektur der Biomasseinversion durch die Dekompositionsparameter α , Entropie und Anisotropie verminderte den Fehler nur unwesentlich.

Welche Vegetationsparameter sollten in situ erhoben werden, um die Schätzung weiterer Parameter mittels SAR-Fernerkundungsdaten zu unterstützen?

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen zeigten hier die Daten nach der radiometrischen Normierung nur einen schwachen oder verschwindenden Zusammenhang mit dem lokalen Einfallswinkel. Dafür konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Rückstreuung und einzelbaumbezogenen Strukturparametern wie Kronenlänge sowie Bestandesparametern wie Schichtung nachgewiesen werden. Diese Parameter sind daher als Unterstützung einer weiterführenden Analyse (Biomasseinversion) äusserst wertvoll. Ebenso hat sich gezeigt, dass die Einzelbaumpositionen eine Schätzung des Ausdünnungsparameters ermöglichen. Die Schätzung dieser Grösse ist von zentraler Bedeutung für einen globalen Vergleich von Testgebieten. Einzelbaumpositionen könnten

auch mittels anderer Fernerkundungsverfahren (z. B. LiDAR [Morsdorf 04]) verlässlich geschätzt werden, was eine aufwändige Felderhebung ersetzen würde.

Wie kann ein Streumodell so an die Bedürfnisse der polarimetrischen SAR-Fernerkundung angepasst werden, dass mit realistischem Rechenaufwand Datenprodukte simuliert werden können, die in ihrer Charakteristik der gemessenen Vegetationsrückstreuung weitgehend entsprechen?

Nach der Anpassung der Formulierung der *discrete dipole approximation (DDA)* an das frequenzmodulierte *SAR*-Signal und mit den beschriebenen Vereinfachungen zur Reduktion der Rechenzeit konnte erfolgreich ein komplexes, ökologisch kalibriertes Baummodell in die Simulation integriert werden. Dies hat zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Die Simulation ermöglicht, die Rückstreuung in Abhängigkeit vom Einzelbaumvolumen zu schätzen. Es hat sich gezeigt, dass die aus der Simulation resultierenden Werte eine hohe Übereinstimmung mit den *SAR*-Daten zeigen. Die Einzelbaumrückstreuung ist die Grundlage für die Analyse des Zusammenhangs zwischen *SAR*-Messung, Ausdünnung und Biomasse.
- Die Wichtigkeit der Ausdünnung konnte in der Simulation nachvollzogen werden. Nur die Berücksichtigung der Ausdünnung führte zu einer hohen Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.
- Die Abschwächung der Rückstreuung in geschichteten Vegetationsvolumen konnte in der Simulation ebenfalls nachvollzogen werden.
- Es konnte gezeigt werden, dass sich die elektrische Leitfähigkeit von Boden und Holz unterschiedlich auf die Streumechanismen auswirkt. Die Volumenstreuung wird massgeblich von der Leitfähigkeit des Holzes beeinflusst, während die kopolaren Mechanismen durch die Bodenreflektivität bestimmt werden.
- Die auf naturnahen Parametrisierungen beruhenden Simulationen bilden alle drei Streumechanismen in guter Übereinstimmung mit den in den Testgebieten gemessenen *SAR*-Daten nach.

Für eine globale Vegetationsparameterschätzung sind solche Verfahren von grossem Interesse, die von einer gebietsabhängigen Statistik unabhängig sind. Im Zentrum dieser Arbeit stand daher

das Bestreben, Zusammenhänge und Mechanismen zu finden, die die gemessene Rückstreuung ursächlich und basierend auf messbaren Vegetationsparametern erklären. Mit der Darstellung der Ausdünnung als ein auf die Rückstreuung wirksamer Mechanismus ist ein Beitrag dazu gelungen. In der Ausdünnung wurde ein grundlegender Mechanismus gefunden, der zu in verschiedenen Testgebieten stark unterschiedlichen Korrelationen zwischen Rückstreuung und Biomasse führen kann. Gegenüber einem rein empirischen Ansatz stellt das einen Mehrwert dar, da es nun möglich ist, gemessene Zusammenhänge zwischen Rückstreuung und Biomasse ursächlich zu erklären.

Es wurden weitere Mechanismen gefunden, welche die empirische Parameterschätzung beeinträchtigen, indem sie dazu führen, dass die für eine bestimmte Biomasse gemessenen Rückstreuungintensitäten vom erwarteten Wert abweichen. Diese Kenntnis der Mechanismen kann nun dazu verwendet werden, um korrigierende Verfahren zu entwickeln, die eine Parametrisierung von semi-empirischen Modellen des Zusammenhangs zwischen Biomasse und Rückstreuung und eine daraus folgende Parameterinversion unterstützen.

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Datensimulation entwickelt, in dem physikalisch exakte Formulierungen der grundlegenden Prozesse beibehalten wurden. Als Mehrwert zu bisherigen Resultaten konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, ein komplexes, naturnahes Baummodell mit wenig einschränkenden Vereinfachungen in einem *full wave* Streumodell zu verwenden und dadurch die Übereinstimmung zwischen Simulation und Natur zu erhöhen. Es konnte gezeigt werden, dass die physikalisch exakte Berücksichtigung von Interaktionen zwischen Streuern insbesondere die Simulation der Volumenstreuung im P-Band verbessert. Das Streumodell ermöglichte weiter, die in den Messdaten gefundenen Wirkungen von Strukturparametern nachzuvollziehen. So konnte in den Simulationen die in den Messungen festgestellte Auswirkung der Ausdünnung auf die Rückstreuung nachgebildet werden.

Die Arbeit trägt zu einer erweiterten Sicht der Rückstreuprozesse im Wald bei: Nicht das Vegetationsvolumen alleine führt zur gemessenen Rückstreuung. Für die umfassende Erklärung der Rückstreuung muss die Struktur des Einzelbaumes sowie die räumliche Anordnung der Bäume berücksichtigt werden. Auch in der Simulation führt nur die grösstmögliche Berücksichtigung der natürlichen Komplexität zu mit Messdaten vergleichbaren Ergebnissen. Um natürliche Prozesse und Mechanismen zu verstehen, ist es notwendig, die Komplexität der Strukturen und Mechanismen mit dem aktuellen Wissensstand und den verfügbaren technischen Möglichkeiten zu beschreiben.

4.3 Ausblick

Im Laufe der Untersuchungen für diese Arbeit haben sich neue Forschungsschwerpunkte eröffnet, die für die Weiterentwicklung der gezeigten Verfahren und Methoden erfolgversprechend sind.

- Der Mechanismus der Ausdünnung stellt für alle Verfahren, die ein Signal messen, das sich nicht direkt proportional zum Biomassevolumen verhält, eine Herausforderung dar. Die Ausdünnung kann einen kritischen Wert erreichen, der zu konstanter Rückstreuung trotz Biomasseänderung führt. Es müssen Korrekturverfahren entwickelt werden, die erlauben, einzelne kleinräumige Einheiten (Stichproben) in die Ausdünnungsdynamik einzuordnen. Dies bedingt eine genaue Kenntnis der Einzelbaumbiomasse aller Bäume in der Stichprobe sowie die genauen Baumabstände. Dafür sollten die Felderhebungen angepasst werden oder neue Methoden entwickelt werden, die sich auf andere Technologien der Fernerkundung wie *airborne laser scanning (LiDAR)* abstützen.
- Die Biomasse borealer Wälder als Parameter ist deshalb von so grossem Interesse, da sie in direktem Zusammenhang steht mit Veränderungen im globalen Kohlenstoffkreislauf. Der boreale Nadelwald im Testgebiet Krycklan zeigt eine deutlich höhere Ausdünnung als die anderen, weiter südlich gelegenen Testgebiete. Wenn boreale Wälder typischerweise eine starke Ausdünnung zeigen, wird die Biomasseschätzung in diesen Gebieten stark erschwert, in denen man sich gerade durch zukünftige Satellitensysteme eine flächenhafte Überwachung erhofft (z. B. im Rahmen der ESA BIOMASS-Mission). Anschliessende Untersuchungen könnten zum Ziel haben, das Ausdünnungsverhalten borealer Wälder flächenhaft zu dokumentieren, wofür die in dieser Arbeit dargestellte Methodik einen Beitrag leisten kann.
- Einen weiteren Weg für das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufes könnten andere Strukturparameter als die Biomasse eröffnen, wenn sie mit einem veränderten Waldwachstum in Verbindung gebracht werden können. Polarimetrischen *SAR*-Daten bieten ein hohes Potential für die Schätzung solcher Parameter, da die Rückstreuung in allen Kanälen empfindlich auf eine Strukturänderung reagiert.
- In dieser Arbeit wurde nur das ökologisch kalibrierte Baummodell einer Spezies verwendet. Es wäre zu zeigen, wie sich die strukturellen Unterschiede zwischen verschiedenen Spezies (vor allem die Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbäumen) auf die Rückstreuung

auswirken. Dass kein dominanter Effekt in den Messungen nachgewiesen werden konnte, bedeutet nicht, dass solche Unterschiede nicht auftreten. Eventuell sind sie in den realen Messdaten zu wenig deutlich von anderen Effekten abzugrenzen.

- Das Simulationsverfahren kann ohne weitere Anpassungen für tiefere Frequenzen verwendet werden. Für höhere Frequenzen sind die Einzelstreuer des Baummodells aber zu gross. Wenn die Streuer in kleinere Zylinder zerlegt werden, nimmt die Zahl der Einzelstreuer und somit die Anforderung an die Rechenzeit stark zu. Hier besteht ein Entwicklungsbedarf, was die Diskretisierung von strukturell komplexen Baummodellen für die Simulation in höheren Frequenzen betrifft.
- Eine Erweiterung des Simulationsverfahrens ist die Berücksichtigung der Interaktionen *zwischen* Einzelbäumen. Die Interaktionen zwischen den Einzelstreuern hat sich als kritisch dafür erwiesen, die Streumechnanismen naturnah zu simulieren. Die Interaktion zwischen Einzelbäumen wäre ein weiterer logischer Schritt zur realitätsnahen Simulation von *SAR*-Daten und vor allem für Szenarien mit einer hohen Baumdichte oder ausgeprägter Schichtung von Interesse.

Literaturverzeichnis

- [Ainsworth 06] T. L. Ainsworth and L. Ferro-Famil, "Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 4, pp. 994–1003, 2006.
- [Albertsen 74] N. Albertsen, J. Hansen, and N. Jensen, "Computation of radiation from wire antennas on conducting bodies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 22, no. 2, pp. 200–206, 1974.
- [Amirmazlaghani 12] M. Amirmazlaghani and H. Amindavar, "A novel sparse method for despeckling SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 12, pp. 5024–5032, 2012.
- [Anderson 99] E. Anderson, Z. Bai, C. Bischof, S. Blackford, J. Demmel, J. Dongarra, J. Du Croz, A. Greenbaum, S. Hammarling, A. McKenney, and D. Sorensen, *LAPACK users' guide*, 3rd ed. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [Argenti 12] F. Argenti, T. Bianchi, A. Lapini, and L. Alparone, "Fast MAP despeckling based on Laplacian-Gaussian modeling of wavelet coefficients," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 13–17, 2012.
- [Barber 12] M. Barber, F. Grings, P. Perna, M. Piscitelli, M. Maas, C. Bruscantini, J. Jacobo-Berlles, and H. Karszenbaum, "Speckle noise and soil heterogeneities as error sources in a Bayesian soil moisture retrieval scheme for SAR data," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 3, pp. 942–951, 2012.
- [Barnes 86] R. M. Barnes, *Polarimetric calibration using in-scene reflectors*. Rep. TT-65, MIT, Lincoln Laboratory, Lexington, MA, 1986.
- [Barrowes 01] B. E. Barrowes, F. L. Teixeira, and J. A. Kong, "Fast algorithm for matrix-vector multiply of asymmetric multilevel block-Toeplitz matrices in 3-D scattering," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 28–32, 2001.
- [Bau09] *Aufnahmeanleitung Stichprobeninventur*. Zürich, CH: Baudirektion Kanton Zürich, 2009.
- [Beaudoin 94] A. Beaudoin, T. Le Toan, S. Goze, E. Nezry, A. Lopes, E. Mougin, C. C. Hsu, H. C. Han, J. A. Kong, and R. T. Shin, "Retrieval of forest biomass from SAR data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, no. 14, pp. 2777–2796, 1994.
- [Berg 12] A. Berg and L. E. B. Eriksson, "SAR algorithm for sea ice concentration—Evaluation for the Baltic Sea," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 938–942, 2012.
- [Boerner 87] W.-M. Boerner, B.-Y. Foo, and H. Eom, "Interpretation of the polarimetric co-polarization phase term in radar images obtained with the JPL airborne L-band SAR system," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 1, pp. 77–82, 1987.
- [Boerner 98] W.-M. Boerner, H. Mott, E. Lüneburg, C. Livingstone, B. Brisco, R. J. Brown, and J. S. Paterson, "Polarimetry in radar remote sensing. Basic and applied concepts." in *Principles and applications of imaging radar*, F. M. Henderson and A. J. Lewis, Eds. New York: John Wiley & Sons, inc., 1998, pp. 271–357.
- [Bonan 92] G. B. Bonan, D. Pollard, and S. L. Thompson, "Effects of boreal forest on global climate," *Nature*, vol. 359, pp. 716–718, 1992.
- [Born 11] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, 7th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- [Brock 92] B. C. Brock, "A simple polarimetric calibration method which utilizes a reference target," in *Digest of Antennas and Propagation Society International Symposium 1992*, vol. 1, 1992, pp. 565–568.
- [Brolly 10] M. Brolly and I. H. Woodhouse, "A Matchstick Model of microwave backscatter from a forest: A change of regime," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2010, pp. 3295–3298.
- [Brolly 12a] —, "A "Matchstick Model" of microwave backscatter from a forest," *Ecological Modelling*, vol. 237–238, pp. 74–87, 2012.

- [Brolly 12b] M. Brolly, I. H. Woodhouse, K. J. Niklas, and S. T. Hammond, "A macroecological analysis of SERA derived forest heights and implications for forest volume remote sensing." *PloS one*, vol. 7, no. 3, p. e33927, 2012.
- [Cameron 90] W. L. Cameron and L. K. Leung, "Feature motivated polarization scattering matrix decomposition," in *IEEE International Conference on Radar*, 1990, pp. 549–557.
- [Cameron 96] W. L. Cameron, N. N. Youssef, and L. K. Leung, "Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 3, pp. 793–803, 1996.
- [Carrea 01] L. Carrea and G. Wanielik, "Polarimetric SAR processing using the polar decomposition of the scattering matrix," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2001, pp. 363–365.
- [Castel 97] T. Castel, A. Beaudoin, J. F. Barczi, Y. Caraglio, N. Floury, T. Le Toan, and L. Castagnas, "On the coupling of backscatter models with tree growth models. 1. A realistic description of the canopy using the AMAP tree growth model," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2, Aug. 1997, pp. 784–786.
- [Castel 01a] T. Castel, A. Beaudoin, N. Floury, T. Le Toan, Y. Caraglio, and J. F. Barczi, "Deriving forest canopy parameters for backscatter models using the AMAP architectural plant model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 3, pp. 571–583, 2001.
- [Castel 01b] T. Castel, Y. Caraglio, A. Beaudoin, and F. Borne, "Using SIR-C SAR data and the AMAP model for forest attributes retrieval and 3-D stand simulation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, pp. 279–290, 2001.
- [Charbonneau 10] F. J. Charbonneau, B. Brisco, R. K. Raney, H. McNairn, C. Liu, P. W. Vachon, J. Shang, R. DeAbreu, C. Champagne, A. Merzouki, and T. Geldsetzer, "Compact polarimetry overview and applications assessment," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. S2, pp. S298–S315, 2010.
- [Chauhan 91] N. S. Chauhan, R. H. Lang, and K. J. Ranson, "Radar modeling of a boreal forest," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, pp. 627–638, 1991.
- [Chen 12] H. Chen, Y. Zhang, H. Wang, and C. Ding, "Stationary-wavelet-based despeckling of SAR images using two-sided generalized Gamma models," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 1061–1065, 2012.
- [Choudhury 79] B. J. Choudhury, A. T. C. Chang, T. J. Schmugge, V. V. Salomonson, and J. R. Wang, "Preliminary results of SAR soil moisture experiment, November 1975," *NASA technical paper 1404*, pp. 1–16, 1979.
- [Cihlar 75] J. Cihlar, F. T. Ulaby, R. Mueller, and L. B. J. S. C. Center, "Soil moisture detection from radar imagery of the Phoenix, Arizona test site," in *NASA contractor report*. Lawrence, KS, USA: University of Kansas Center for Research, 1975.
- [Cloude 86] S. R. Cloude, "The characterisation of polarisation effects in EM scattering." Ph.D. dissertation, University of Birmingham, UK, 1986.
- [Cloude 92] S. R. Cloude, H. Brand, L. A. Cram, W. A. Holm, D. E. Stein, W. Wiesbeck, W. Keydel, D. Giuli, D. T. Gjessing, and F. A. Molinet, "Uniqueness of target decomposition theorems in radar polarimetry," in *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, Part 1*, NATO-ARW, W. M. Boerner and Others, Eds. Norwell, MA, USA: Kluwer, 1992, pp. 267–296.
- [Cloude 96] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 498–518, 1996.
- [Cloude 97] —, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 68–78, 1997.
- [Cloude 12] S. R. Cloude, D. G. Goodenough, and H. Chen, "Compact decomposition theory," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 28–32, 2012.
- [Curlander 91] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic aperture radar: Systems and signal processing*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1991.
- [Daian 05] G. Daian, A. Taube, A. Birnboim, Y. Shramkov, and M. Daian, "Measuring the dielectric properties of wood at microwave frequencies," *Wood Science and Technology*, vol. 39, pp. 215–223, 2005.

- [Daian 06] G. Daian, A. Taube, A. Birnboim, M. Daian, and Y. Shramkov, "Modeling the dielectric properties of wood," *Wood Science and Technology*, vol. 40, pp. 237–246, 2006.
- [deBadereau 03] D. de Badereau, H. N'guyen, H. Roussel, and W. Tabbara, "Radar remote sensing of forests at low frequencies: A 3D electromagnetic scattering model," *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2, pp. 1353–1355, 2003.
- [Ding 03] K.-H. Ding and L. Tsang, "A sparse matrix iterative approach for modeling tree scattering," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 38, no. 3, pp. 198–202, 2003.
- [Dinh 13] H. T. M. Dinh, T. Le Toan, F. Rocca, S. Tebaldini, M. M. D'Alessandro, and L. Villard, "Relating P-band synthetic aperture radar tomography to tropical forest biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 1–1, 2013.
- [Disney 06] M. Disney, P. Lewis, and P. Saich, "3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains," *Remote Sensing of Environment*, vol. 100, no. 1, pp. 114–132, 2006.
- [Dobson 92] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, T. Le Toan, A. Beaudoin, E. S. Kasischke, and N. L. Christensen, "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 412–415, 1992.
- [Draine 88] B. T. Draine, "The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains," *The Astrophysical Journal*, vol. 333, p. 848, 1988.
- [Draine 94] B. T. Draine and P. J. Flatau, "Discrete-dipole approximation for scattering calculations," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 11, no. 4, p. 1491, 1994.
- [Draine 12] —, "User guide to the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.2, 2012." [Online]. Available: <https://code.google.com/p/ddscat/>
- [Drake 74] B. Drake and R. A. Shuchman, "Feasibility of using multiplexed SLAR imagery for water resources management and mapping vegetation communities," in *9th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1974, pp. 219–249.
- [Du 96] L. J. Du and J.-S. Lee, "Polarimetric SAR image classification based on target decomposition theorem and complex Wishart distribution," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, May 1996, pp. 439–441.
- [Durden 89] S. L. Durden, J. J. van Zyl, and H. A. Zebker, "Modeling and observation of the radar polarization signature of forested areas," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 3, pp. 290–301, 1989.
- [Durden 91] S. L. Durden, J. D. Klein, and H. A. Zebker, "Polarimetric radar measurements of a forested area near Mt. Shasta," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 3, pp. 444–450, 1991.
- [Espinoza Molina 12] D. Espinoza Molina, D. Gleich, and M. Datcu, "Evaluation of Bayesian despeckling and texture extraction methods based on Gauss-Markov and auto-binomial Gibbs random fields: Application to TerraSAR-X data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 2001–2025, 2012.
- [Evans 88] D. L. Evans, T. G. Farr, J. J. van Zyl, and H. A. Zebker, "Radar polarimetry: Analysis tools and applications," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, no. 6, pp. 774–789, 1988.
- [Ferrazzoli 92] P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Schiavon, D. Solimini, and P. Coppo, "Sensitivity to microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content: A case study," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 4, pp. 750–756, 1992.
- [Ferrazzoli 97] P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Schiavon, S. Sigismondi, and D. Solimini, "The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 5–17, 1997.
- [Ferro-Famil 01] L. Ferro-Famil and E. Pottier, "Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 11, pp. 2332–2342, 2001.
- [Freeman 91] A. Freeman, "A new system model for radar polarimeters," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 5, pp. 761–767, 1991.

- [Freeman 92a] —, “SAR calibration: An overview,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 6, pp. 1107–1121, 1992.
- [Freeman 92b] A. Freeman, J. J. van Zyl, J. D. Klein, H. A. Zebker, and Y. Shen, “Calibration of Stokes and scattering matrix format polarimetric SAR data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 3, pp. 531–539, 1992.
- [Freeman 98] A. Freeman and S. L. Durden, “A three-component scattering model for polarimetric SAR data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, 1998.
- [Freeman 04] A. Freeman, “Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 8, pp. 1617–1624, 2004.
- [Freeman 07] —, “Fitting a two-component scattering model to polarimetric SAR data from forests,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 8, pp. 2583–2592, 2007.
- [Frey 10] O. Frey, “Synthetic aperture radar imaging in the time domain for nonlinear sensor trajectories and SAR tomography,” Ph.D. dissertation, University of Zurich, 2010. [Online]. Available: <http://www.zora.uzh.ch/45767/>
- [Frost 82] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, and J. C. Holtzman, “A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-4, no. 2, pp. 157–166, 1982.
- [Gamba 12] P. Gamba and M. Aldrichi, “SAR data classification of urban areas by means of segmentation techniques and ancillary optical data,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 4, pp. 1140–1148, 2012.
- [Goodman 91] J. J. Goodman, B. T. Draine, and P. J. Flatau, “Application of fast-Fourier-transform techniques to the discrete-dipole approximation,” *Optics Letters*, vol. 16, no. 15, p. 1198, 1991.
- [Gray 90] A. L. Gray, P. W. Vachon, C. E. Livingstone, and T. I. Lukowski, “Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 3, pp. 374–383, 1990.
- [Hajnsek 03] I. Hajnsek, E. Pottier, and S. R. Cloude, “Inversion of surface parameters from polarimetric SAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 4, pp. 727–744, 2003.
- [Hajnsek 08] I. Hajnsek, R. Scheiber, L. M. H. Ulander, A. Gustavsson, G. Sandberg, S. Tebaldini, A. Monte Guarnieri, F. Rocca, F. Bombardini, and M. Pardini, “BIOSAR 2007 technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2007 experiment. Final report without synthesis,” EuropeanSpace Agency, ESA contract no. 20755/07/NL/CB, 2008.
- [Hajnsek 09] I. Hajnsek, L. M. H. Ulander, A. Gustavsson, G. Sandberg, T. Le Toan, S. Tebaldini, A. Monte Guarnieri, and F. Rocca, “BIOSAR 2008. Technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2008 experiment, Final report,” EuropeanSpace Agency, ESA contract no. 22052/08/NL/CT, 2009.
- [Hanssen 01] R. F. Hanssen, “Radar Interferometry, vol. 2,” in *Radar Interferometry, vol. 2*. Norwell, MA, USA: Kluwer, 2001, ch. 6.3 Ionosp, pp. 383–390.
- [Hardy 04] M. Hardy and A. Bryman, *Handbook of data analysis*. London, UK: SAGE Publications, 2004. [Online]. Available: <http://srmo.sagepub.com/view/handbook-of-data-analysis/SAGE.xml>
- [Hoekman 00] D. H. Hoekman and M. J. Quiñones, “Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 685–696, 2000.
- [Hoekman 02] —, “Biophysical forest type characterization in the Colombian Amazon by airborne polarimetric SAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 6, pp. 1288–1300, 2002.
- [Hoekman 03] D. H. Hoekman and M. A. M. Vissers, “A new polarimetric classification approach evaluated for agricultural crops,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 12, pp. 2881–2889, 2003.
- [Hoekstra 93] A. G. Hoekstra and P. M. A. Sloot, “New computational techniques to simulate light scattering from arbitrary particles,” *Proceeding of the Third International Congress on Optical Particle Sizing*, pp. 167–172, 1993.
- [Hoffmann 84] C. Hoffmann, “Volumenfunktionen,” Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), internal report, 1984.

- [Holm 88] W. A. Holm and R. M. Barnes, "On radar polarization mixed target state decomposition techniques," *Proceedings of the 1988 IEEE National Radar Conference*, pp. 249–254, 1988.
- [Hou 12] B. Hou, X. Zhang, X. Bu, and H. Feng, "SAR image despeckling based on nonsubsampling shearlet transform," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 3, pp. 809–823, 2012.
- [Hussin 91] Y. A. Hussin, R. M. Reich, and R. M. Hoffer, "Estimating splash pine biomass using radar backscatter," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 3, pp. 427–431, 1991.
- [Huynen 65] J. R. Huynen, "Measurement of the target scattering matrix," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 936–946, 1965.
- [Imhoff 95a] M. L. Imhoff, "A theoretical analysis of the effect of forest structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing of biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 341–352, 1995.
- [Imhoff 95b] —, "Radar backscatter and biomass saturation: Ramifications for global biomass inventory," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 511–518, 1995.
- [Israelsson 94] H. Israelsson, J. I. H. Askne, and R. Sylvander, "Potential of SAR for forest bole volume estimation," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, no. 14, pp. 2809–2826, 1994.
- [Israelsson 97] H. Israelsson, L. M. H. Ulander, J. I. H. Askne, J. E. S. Fransson, P.-O. Frolind, A. Gustavsson, and H. Hellsten, "Retrieval of forest stem volume using VHF SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 36–40, 1997.
- [Israelsson 00] H. Israelsson, L. M. H. Ulander, T. Martin, and J. I. H. Askne, "A coherent scattering model to determine forest backscattering in the VHF-band," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 1, pp. 238–248, 2000.
- [Jehle 08] M. Jehle, D. Perler, D. Small, A. Schubert, and E. Meier, "Estimation of atmospheric path delays in TerraSAR-X data using models vs. measurements," *Sensors*, vol. 8, no. 12, pp. 8479–8491, 2008.
- [Jehle 09] M. Jehle, M. Rüegg, L. Zuberbühler, D. Small, and E. Meier, "Measurement of ionospheric Faraday rotation in simulated and real spaceborne SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, pp. 1512–1523, 2009.
- [Kane 66] Y. Kane, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, 1966.
- [Karam 88] M. A. Karam and A. K. Fung, "Electromagnetic scattering from a layer of finite length, randomly oriented, dielectric, circular cylinders over a rough interface with application to vegetation," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 6, pp. 1109–1134, 1988.
- [Karam 92] M. A. Karam, A. K. Fung, R. H. Lang, and N. S. Chauhan, "A microwave scattering model for layered vegetation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 4, pp. 767–784, 1992.
- [Karlsson 05] A. Karlsson, J. He, J. Swartling, and S. Andersson-Engels, "Numerical simulations of light scattering by red blood cells," *IEEE transactions on bio-medical engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 13–8, 2005.
- [Kasischke 94] E. S. Kasischke, N. L. Christensen, and E. M. Haney, "Modeling of geometric properties of loblolly pine tree and stand characteristics for use in radar backscatter studies," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 800–822, 1994.
- [Kennaugh 52] E. M. Kennaugh, "Polarization properties of radar reflections," Ph.D. dissertation, Ohio State University, 1952.
- [Kim 01] Y. Kim and J. J. van Zyl, "Polarimetric and interferometric SAR calibration verification methods," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2001, pp. 1098–1100.
- [Kimura 04] H. Kimura, T. Mizuno, K. P. Papathanassiou, and I. Hajnsek, "Improvement of polarimetric SAR calibration based on the Quegan algorithm," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Sep. 2004, pp. 184–187.

- [Kirscht 98] M. Kirscht and C. Rinke, "3D reconstruction of buildings and vegetation from synthetic aperture radar (SAR) images," in *Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, 1998, pp. 228–231.
- [Klein 92] J. D. Klein, "Calibration of complex polarimetric SAR imagery using backscatter correlations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 183–194, 1992.
- [Krogager 93] E. Krogager, "Aspects of polarimetric radar imaging," Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1993.
- [Kuan 87] D. Kuan, A. Sawchuk, T. Strand, and P. Chavel, "Adaptive restoration of images with speckle," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 3, pp. 373–383, 1987.
- [Kurvonen 99] L. Kurvonen and M. T. Hallikainen, "Textural information of multitemporal ERS-1 and JERS-1 SAR images with applications to land and forest type classification in boreal zone," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 2, pp. 680–689, 1999.
- [Lakhtakia 92] A. Lakhtakia, "Strong and weak forms of the method of moments and the coupled dipole method for scattering of time-harmonic electromagnetic fields," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 03, no. 03, pp. 583–603, 1992.
- [Lang 83] R. H. Lang and J. S. Sighu, "Electromagnetic backscattering from a layer of vegetation: A discrete approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-21, no. 1, pp. 62–71, 1983.
- [Lardeux 11] C. Lardeux, P.-L. Frison, C. Tison, J.-C. Souyris, B. Stoll, B. Fruneau, and J.-P. Rudant, "Classification of tropical vegetation using multifrequency partial SAR polarimetry," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 133–137, 2011.
- [Le Toan 92] T. Le Toan, A. Beaudoin, J. Riom, and D. Guyon, "Relating forest biomass to SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 403–411, 1992.
- [Le Toan 97] T. Le Toan, F. Ribbes, N. Floury, M. Fujita, and T. Kurosu, "Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 41–56, 1997.
- [Le Toan 11] T. Le Toan, S. Quegan, M. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. P. Papathanassiou, S. Plummer, F. Rocca, S. S. Saatchi, H. Shugart, and L. M. H. Ulander, "The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 11, pp. 2850–2860, 2011.
- [Lee 91] J.-S. Lee, M. R. Grunes, and S. A. Mango, "Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, pp. 535–544, 1991.
- [Lee 99a] J.-S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, D. L. Schuler, and S. R. Cloude, "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2249–2258, 1999.
- [Lee 99b] J.-S. Lee, M. R. Grunes, and G. de Grandi, "Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2363–2373, 1999.
- [Lee 01] J.-S. Lee, M. R. Grunes, and E. Pottier, "Quantitative comparison of classification capability: Fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 11, pp. 2343–2351, 2001.
- [Lee 03] J.-S. Lee, S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, M. R. Grunes, and I. H. Woodhouse, "Speckle filtering and coherence estimation of polarimetric SAR interferometry data for forest applications," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 10, pp. 2254–2263, 2003.
- [Leersnijder 92] R. P. Leersnijder, "PINOGRAM: A pine growth area model." Ph.D. dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1992.
- [Lehmann 12] E. A. Lehmann, P. A. Caccetta, Z.-S. Zhou, S. J. McNeill, X. Wu, and A. L. Mitchell, "Joint processing of Landsat and ALOS-PALSAR data for forest mapping and monitoring," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 1, pp. 55–67, 2012.
- [Li 12] G.-T. Li, C.-L. Wang, P.-P. Huang, and W.-D. Yu, "SAR image despeckling using a space-domain filter with alterable window," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp. 1–5, 2012.

- [Lin 95] Y.-C. Lin and K. Sarabandi, "Electromagnetic scattering model for a tree trunk above a tilted ground plane," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 1063–1070, 1995.
- [Lin 99] —, "A Monte Carlo coherent scattering model for forest canopies using fractal-generated trees," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 1, pp. 440–451, 1999.
- [Lischke 01] H. Lischke and P. Brassel, *Swiss national forest inventory: Methods and models of the second assessment*. Birmensdorf, CH: WSL Swiss Federal Research Institute, 2001.
- [López-Martínez 03] C. López-Martínez and X. Fabregas, "Polarimetric SAR speckle noise model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 10, pp. 2232–2242, 2003.
- [López-Martínez 05] C. López-Martínez, E. Pottier, and S. R. Cloude, "Statistical assessment of eigenvector-based target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 9, pp. 2058–2074, 2005.
- [López-Martínez 11] C. López-Martínez, X. Fàbregas, and L. Pipia, "Forest parameter estimation in the Pol-InSAR context employing the multiplicative-additive speckle noise model," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 5, pp. 597–607, 2011.
- [Lu 10] B. Lu, L. Zhang, and F. Xing, "SAR speckle reduction based on nonlocal means method," in *2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation*, Jan. 2010, pp. 156–159.
- [Marino 10] A. Marino, S. R. Cloude, and I. H. Woodhouse, "A polarimetric target detector using the Huynen fork," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 5, pp. 2357–2366, 2010.
- [Mason 12] D. C. Mason, I. J. Davenport, J. C. Neal, G. J.-P. Schumann, and P. D. Bates, "Near real-time flood detection in urban and rural areas using high-resolution synthetic aperture radar images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 8, pp. 3041–3052, 2012.
- [Mätzler 02] C. Mätzler, "MATLAB functions for Mie scattering and absorption version 1," Institut für Angewandte Physik, Mikrowellenabteilung, Universität Bern, 2002.
- [McDonald 90] K. C. McDonald, M. C. Dobson, and F. T. Ulaby, "Using Mimics to model L-band multiangle and multitemporal backscatter from a walnut orchard," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 477–491, 1990.
- [Meier 89] E. Meier, "Geometrische Korrektur von Bildern orbitgestützter SAR-Systeme," in *Remote Sensing Series, vol 15*. Zürich, CH: University of Zurich, Department of Geography, 1989.
- [Mitchard 09] E. T. A. Mitchard, S. S. Saatchi, I. H. Woodhouse, G. Nangendo, N. S. Ribeiro, M. Williams, C. M. Ryan, S. L. Lewis, T. R. Feldpausch, and P. Meir, "Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 23, pp. 1–6, 2009.
- [Morsdorf 04] F. Morsdorf, E. Meier, B. Kötz, K. I. Itten, M. Dobbertin, and B. Allgöwer, "LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management," *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, no. 3, pp. 353–362, 2004.
- [Neumann 12] M. Neumann, S. S. Saatchi, L. M. H. Ulander, and J. E. S. Fransson, "Assessing performance of L- and P-band polarimetric interferometric SAR data in estimating boreal forest above-ground biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 3, pp. 714–726, 2012.
- [Nguyen 06] H. Nguyen, H. Roussel, and W. Tabbara, "A coherent model of forest scattering and SAR imaging in the VHF and UHF-band," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 4, pp. 838–848, 2006.
- [Oliver 00] C. J. Oliver, "Rain forest classification based on SAR texture," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 1095–1104, 2000.
- [Paloscia 99] S. Paloscia, G. Macelloni, P. Pampaloni, and S. Sigismondi, "The potential of C- and L-band SAR in estimating vegetation biomass: The ERS-1 and JERS-1 experiments," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 4, pp. 2107–2110, 1999.
- [Pan 05a] L. Pan, M. Moghaddam, L. Pierce, and R. Lucas, "Radar backscattering model for multilayer mixed-species forests," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 11, pp. 2612–2626, 2005.

- [Pan 05b] L. Pan, L. Pierce, and M. Moghaddam, "Radiative transfer model for microwave bistatic scattering from forest canopies," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 11, pp. 2470–2483, 2005.
- [Pardé 88] J. Pardé and J. Bouchon, *Dendrométrie. 2 ed.* Nancy, F: École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (ENGREF), 1988.
- [Parrilli 12] S. Parrilli, M. Poderico, C. V. Angelino, and L. Verdoliva, "A nonlocal SAR image denoising algorithm based on LLMSE wavelet shrinkage," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 2, pp. 606–616, 2012.
- [Peplinski 95] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, "Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp. 803–807, 1995.
- [Perttunen 98] J. Perttunen, R. Sievänen, and E. Nikinmaa, "LIGNUM: A model combining the structure and the functioning of trees," *International Journal on Ecological Modelling and Systems Ecology*, vol. 108, no. 1-3, 1998.
- [Pottier 90] E. Pottier, "Contribution de la polarimétrie dans la discrimination de cibles radar. Application à l'imagerie electromagnétique haute résolution," Ph.D. dissertation, Université de Rennes, 1990.
- [Pottier 11] E. Pottier and L. Ferro-Famil, "PolSARPro The polarimetric SAR data processing and educational tool. Version 4.2, 2011." [Online]. Available: <http://earth.esa.int/polsarpro/>
- [Praks 00] J. Praks and M. T. Hallikainen, "A novel approach in polarimetric covariance matrix eigendecomposition," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2000, pp. 1119–1121.
- [Praks 01] J. Praks, H. Alasalmi, and M. T. Hallikainen, "Polarimetric properties of boreal forest in L- and C-band SAR images," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2001, pp. 3050–3052.
- [Praks 03] J. Praks, J. T. Pulliainen, P. Ahtonen, and M. T. Hallikainen, "Examination of forest polarimetric backscattering with coherent cylinder model," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2003, pp. 923–925.
- [Prusinkiewicz 90] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer, *The algorithmic beauty of plants.* New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1990.
- [Pulliainen 96] J. T. Pulliainen, P. J. Mikkilä, M. T. Hallikainen, and J.-P. Ikonen, "Seasonal dynamics of C-band backscatter of boreal forests with applications to biomass and soil moisture estimation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 3, pp. 758–770, 1996.
- [Quegan 94] S. Quegan, "A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 1, pp. 89–99, 1994.
- [Quiñones 04] M. J. Quiñones and D. H. Hoekman, "Exploration of factors limiting biomass estimation by polarimetric radar in tropical forests," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 1, pp. 86–104, 2004.
- [Raney 07] R. K. Raney, "Hybrid-polarity SAR architecture," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3397–3404, 2007.
- [Ranson 94] K. J. Ranson, "Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 2, pp. 388–396, 1994.
- [Rauste 94] Y. Rauste, T. Hame, J. T. Pulliainen, K. Heiska, and M. T. Hallikainen, "Radar-based forest biomass estimation," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, no. 14, pp. 2797–2808, 1994.
- [Rignot 95] E. J. M. Rignot, R. Zimmermann, and J. J. van Zyl, "Spaceborne applications of P band imaging radars for measuring forest biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 5, pp. 1162–1169, 1995.
- [Rignot 00] E. J. M. Rignot, "Effect of Faraday rotation on L-band interferometric and polarimetric synthetic-aperture radar data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 1, pp. 383–390, 2000.
- [Saatchi 00] S. S. Saatchi and M. Moghaddam, "Estimation of crown and stem water content and biomass of boreal forest using polarimetric SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 697–709, 2000.

- [Saatchi 07] S. S. Saatchi, K. Halligan, D. G. Despain, and R. L. Crabtree, "Estimation of forest fuel load from radar remote sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 6, pp. 1726–1740, 2007.
- [Saatchi 11a] S. S. Saatchi, N. L. Harris, S. Brown, M. Lefsky, E. T. A. Mitchard, W. Salas, B. R. Zutta, W. Buermann, S. L. Lewis, S. Hagen, S. Petrova, L. White, M. Silman, and A. Morel, "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, no. 24, pp. 899–904, 2011.
- [Saatchi 11b] S. S. Saatchi, M. Marlier, R. L. Chazdon, D. B. Clark, and A. E. Russell, "Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 11, pp. 2836–2849, 2011.
- [Sader 87] S. A. Sader, "Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band synthetic aperture radar data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 193–202, 1987.
- [Saepuloh 12] A. Saepuloh, K. Koike, and M. Omura, "Applying Bayesian decision classification to Pi-SAR polarimetric data for detailed extraction of the geomorphologic and structural features of an active volcano," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 554–558, 2012.
- [Sandberg 11] G. Sandberg, L. M. H. Ulander, J. E. S. Fransson, J. Holmgren, and T. Le Toan, "L- and P-band backscatter intensity for biomass retrieval in hemiboreal forest," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 11, pp. 2874–2886, 2011.
- [Sant'Anna 08] S. J. S. Sant'Anna, J. C. da S. Lacava, and D. Fernandes, "From Maxwell's equations to polarimetric SAR images: A simulation approach," *Sensors*, vol. 8, no. 11, pp. 7380–7409, 2008.
- [Sarabandi 90a] K. Sarabandi and F. T. Ulaby, "A convenient technique for polarimetric calibration of radar systems," *10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 6, pp. 803–806, 1990.
- [Sarabandi 90b] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, and M. Tassoudji, "Calibration of polarimetric radar systems with good polarization isolation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp. 70–75, 1990.
- [Sarabandi 94] K. Sarabandi, "Calibration of a polarimetric synthetic aperture radar using a known distributed target," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 3, pp. 575–582, 1994.
- [Sarabandi 95] K. Sarabandi, L. E. Pierce, M. C. Dobson, F. T. Ulaby, J. M. Stiles, T. C. Chiu, R. De Roo, R. Hartikka, A. Zambetti, and A. Freeman, "Polarimetric calibration of SIR-C using point and distributed targets," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 858–866, 1995.
- [Sato 12] A. Sato, Y. Yamaguchi, and G. Singh, "Four-component scattering power decomposition with extended volume scattering model," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 166–170, 2012.
- [Schellenberger 12] T. Schellenberger, B. Ventura, M. Zebisch, and C. Notarnicola, "Wet snow cover mapping algorithm based on multitemporal COSMO-SkyMed X-band SAR images," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 3, pp. 1045–1053, 2012.
- [Shan 12] Z. Shan, C. Wang, H. Zhang, and W. An, "Improved four-component model-based target decomposition for polarimetric SAR data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 75–79, 2012.
- [Sheen 91] D. R. Sheen, E. L. Johansen, and L. P. Elenbogen, "Evaluation of gridded trihedrals for polarimetric calibration of SAR images," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jun. 1991, pp. 1393–1396.
- [Sinclair 50] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized waves," *Proceedings of the IRE*, vol. 21, pp. 148–151, 1950.
- [Skriver 12] H. Skriver, "Crop classification by multitemporal C- and L-band single- and dual-polarization and fully polarimetric SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 6, pp. 2138–2149, 2012.
- [Small 11] D. Small, "Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 8, pp. 3081–3093, 2011.

- [Smith 00] G. Smith and L. M. H. Ulander, "A model relating VHF-band backscatter to stem volume of coniferous boreal forest," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 728–740, 2000.
- [Smith-Jonforsen 05] G. Smith-Jonforsen and L. M. H. Ulander, "Low VHF-band backscatter from coniferous forests on sloping terrain," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 10, pp. 2246–2260, 2005.
- [Smith-Jonforsen 07] G. Smith-Jonforsen, K. Folkesson, B. Hallberg, and L. M. H. Ulander, "Effects of forest biomass and stand consolidation on P-band backscatter," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 669–673, 2007.
- [Söderberg 86] U. Söderberg, "Funktioner för skogliga produktionsprognoser. Tillväxt och formhöjd för enskilda träd av inhemska trädslag i Sverige [Funktionen för Wald-Produktivitätsprognosen. Zuwachs und Formhöhe für Einzelbäume einheimischer Baumarten in Schweden]," Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Institutionen för skogstaxering, Rapport 14, Umeå, 1986.
- [Söderberg 92] —, "Funktioner för skogsindelning. Höjd, formhöjd och barktjocklek för enskilda träd [Funktionen für die Forstinventur. Höhe, Formhöhe und Borkendicke für Einzeläume]," Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Institutionen för skogstaxering, Rapport 52, Umeå, 1992.
- [Soja 13] M. J. Soja, G. Sandberg, and L. M. H. Ulander, "Regression-based retrieval of boreal forest biomass in sloping terrain using P-band SAR backscatter intensity data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 5, pp. 2646–2665, 2013.
- [Soumekh 99] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1999.
- [Souyris 05] J.-C. Souyris, P. Imbo, R. Fjortoft, S. Mingot, and J.-S. Lee, "Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 3, pp. 634–646, 2005.
- [Souyris 06] J.-C. Souyris and C. Tison, "Polar decomposition and polarimetric SAR analysis: A quaternion approach," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2006, pp. 1752–1755.
- [Souyris 07] —, "Multi-look polar decomposition of polarimetric SAR images," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2007, pp. 4144–4147.
- [Stiles 82] J. A. Stiles, V. S. Frost, J. C. Holtzman, and K. S. Shanmugam, "The recognition of extended targets: SAR images for level and hilly terrain," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-20, no. 2, pp. 205–211, 1982.
- [Stiles 96] J. M. Stiles and K. Sarabandi, "A scattering model for thin dielectric cylinders of arbitrary cross section and electrical length," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 2, pp. 260–266, 1996.
- [Sun 00] G. Sun, K. J. Ranson, and V. I. Kharuk, "Forest biomass estimation in Western Sayani mountains, Siberia from SAR data," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2000, pp. 435–437.
- [Surussavadee 06] C. Surussavadee and D. Staelin, "Comparison of AMSU millimeter-wave satellite observations, MM5/TBSCAT predicted radiances, and electromagnetic models for hydrometeors," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 10, pp. 2667–2678, 2006.
- [Taflove 83] A. Taflove and K. Umashankar, "Radar cross section of general three-dimensional scatterers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-25, no. 4, pp. 433–440, 1983.
- [Taylor 69] C. Taylor and T. Shumpert, "Electromagnetic pulse scattering in time-varying inhomogeneous media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 17, no. 5, pp. 585–589, 1969.
- [Taylor 97] J. R. Taylor, *An introduction to error analysis*. Sausalito, CA, USA: University Science Books, 1997.
- [Tebaldini 10] S. Tebaldini, M. M. D'Alessandro, and F. Rocca, "SAR imaging of forest structure at longer wavelengths," in *2010 IEEE Radar Conference*, 2010, pp. 811–815.
- [Thirion 04] L. Thirion, I. Chênerie, and C. Galy, "Application of a coherent model in simulating the backscattering coefficient of a mangrove forest," *Waves in Random Media*, vol. 14, no. 2, pp. S299–S316, 2004.

- [Thirion 05] L. Thirion and E. Colin, "On the use of a coherent scattering model to determine the origin of artificial signatures of a target hidden in forest," in *Proceedings of PolInSar 2005*, 2005.
- [Thirion 06] L. Thirion, E. Colin, and C. Dahon, "Capabilities of a forest coherent scattering model applied to radiometry, interferometry, and polarimetry at P- and L-band," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 4, pp. 849–862, 2006.
- [Thürig 08] E. Thürig and S. Schmid, "Jährliche CO₂-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar," *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 159, no. 2, pp. 31–38, 2008.
- [Torgovnikov 93] G. I. Torgovnikov, *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Berlin, D: Springer-Verlag, 1993.
- [Touzi 93] R. Touzi, C. E. Livingstone, J. R. C. Lafontaine, and T. I. Lukowski, "Consideration of antenna gain and phase patterns for calibration of polarimetric SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, no. 6, pp. 1132–1145, 1993.
- [Touzi 07] R. Touzi, "Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 1, pp. 73–84, 2007.
- [Tsang 01] L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, and C. O. Ao, *Scattering of electromagnetic waves - Numerical simulations (vol. 2)*. New York, NY, USA: Wiley Interscience, 2001.
- [Ulaby 87] F. T. Ulaby, D. Held, M. Donson, K. C. McDonald, and T. B. A. Senior, "Relating polarization phase difference of SAR signals to scene properties," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 1, pp. 83–92, 1987.
- [Ulaby 90a] F. T. Ulaby and C. Elachi, *Radar polarimetry for geoscience applications*. Norwood, MA, Artech House, 1990.
- [Ulaby 90b] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. C. McDonald, and M. C. Dobson, "Michigan microwave canopy scattering model," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, pp. 1223–1253, 1990.
- [Ulander 11a] L. M. H. Ulander, A. Gustavsson, B. Flood, D. Murdin, P. Dubois-Fernandez, X. Dupuis, G. Sandberg, M. J. Soja, L. E. B. Eriksson, J. E. S. Fransson, J. Holmgren, and J. Wallerman, "BioSAR 2010 technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2010 experiment: Final report," EuropeanSpace Agency, ESA contract no. 4000102285/10/NL/JA/ef, 2011.
- [Ulander 11b] L. M. H. Ulander, G. Sandberg, and M. J. Soja, "Biomass retrieval algorithm based on P-band BioSAR experiments of boreal forest," in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, Jul. 2011, pp. 4245–4248.
- [Umashankar 82] K. Umashankar and A. Taflov, "A novel method to analyze electromagnetic scattering of complex objects," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 4, pp. 397–405, 1982.
- [Ungureanu 09] C. Ungureanu, R. G. Rayavarapu, S. Manohar, and T. G. van Leeuwen, "Discrete dipole approximation simulations of gold nanorod optical properties: Choice of input parameters and comparison with experiment," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 10, 2009.
- [van derVorst 92] H. A. van der Vorst, "Bi-CGSTAB: A fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems," *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, vol. 13, no. 2, pp. 631–644, 1992.
- [vanZyl 89] J. J. van Zyl, "Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 1, pp. 36–45, 1989.
- [vanZyl 90] —, "Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 3, pp. 337–348, 1990.
- [vanZyl 92] J. J. van Zyl and C. F. Burnette, "Bayesian classification of polarimetric SAR images using adaptive a priori probabilities," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no. 5, pp. 835–840, 1992.
- [Walessa 00] M. Walessa and M. Datcu, "Model-based despeckling and information extraction from SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2258–2269, 2000.
- [Wang 08] H. Wang and K. Ouchi, "Accuracy of the K-distribution regression model for forest biomass estimation by high-resolution polarimetric SAR: Comparison of model estimation and field data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 4, pp. 1058–1064, 2008.

- [Wang 12] T.-L. Wang and Y.-Q. Jin, "Postearthquake building damage assessment using multi-mutual information from pre-event optical image and postevent SAR image," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 452–456, 2012.
- [Warnick 00] K. Warnick, "Accuracy of the method of moments for scattering by a cylinder," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 10, pp. 1652–1660, 2000.
- [Warnick 04] K. Warnick and W. C. Chew, "Error analysis of the moment method," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 46, no. 6, pp. 38–53, 2004.
- [Watanabe 06] M. Watanabe, M. Shimada, A. Rosenqvist, T. Tadono, M. Matsuoka, S. A. Romshoo, K. Ohta, R. Furuta, K. Nakamura, and T. Moriyama, "Forest structure dependency of the relation between L-band σ_0 and biophysical parameters," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 11, pp. 3154–3165, 2006.
- [Welsh 04] B. Welsh, B. Kent, and A. Buterbaugh, "Full polarimetric calibration for radar cross-section measurements: Performance analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 9, pp. 2357–2365, 2004.
- [Wohlers 80] M. Wohlers, S. Hsiao, J. Mendelsohn, and G. Gardner, "Computer simulation of synthetic aperture radar images of three-dimensional objects," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-16, no. 3, pp. 258–271, 1980.
- [Woodhouse 00] I. H. Woodhouse and D. H. Hoekman, "Radar modelling of coniferous forest using a tree growth model," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 8, pp. 1725–1737, 2000.
- [Woodhouse 06] I. H. Woodhouse, "Predicting backscatter-biomass and height-biomass trends using a macroecology model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 4, pp. 871–877, 2006.
- [Wright 03] P. Wright, S. Quegan, N. Wheadon, and C. Hall, "Faraday rotation effects on L-band spaceborne SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 12, pp. 2735–2744, 2003.
- [Wu 87a] S.-T. Wu, "Potential application of multipolarization SAR for pine-plantation biomass estimation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 3, pp. 403–409, 1987.
- [Wu 87b] S.-T. Wu and S. A. Sader, "Multipolarization SAR data for surface feature delineation and forest vegetation characterization," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 1, pp. 67–76, 1987.
- [Yamaguchi 05] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, "Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 8, pp. 1699–1706, 2005.
- [Yueh 92] S. H. Yueh, J. A. Kong, J. K. Jao, R. T. Shin, and T. Le Toan, "Branching model for vegetation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 390–402, 1992.
- [Yun 12] S. Yun and H. Woo, "A new multiplicative denoising variational model based on mth root transformation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 21, no. 5, pp. 2523–33, 2012.
- [Yurkin 07a] M. A. Yurkin and A. G. Hoekstra, "The discrete dipole approximation: An overview and recent developments," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 106, no. 1-3, pp. 558–589, 2007.
- [Yurkin 07b] M. A. Yurkin, V. P. Maltsev, and A. G. Hoekstra, "The discrete dipole approximation for simulation of light scattering by particles much larger than the wavelength," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 106, no. 1-3, pp. 546–557, 2007.
- [Yurkin 11] M. A. Yurkin and A. G. Hoekstra, "The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 112, no. 13, pp. 2234–2247, 2011.
- [Zebker 90] H. A. Zebker and Y. Lou, "Phase calibration of imaging radar polarimeter Stokes matrices," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 2, pp. 246–252, 1990.
- [Zebker 91a] H. A. Zebker and J. J. Van Zyl, "Imaging radar polarimetry: A review," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 11, 1991, pp. 1583–1606.
- [Zebker 91b] H. A. Zebker, J. J. Van Zyl, S. L. Durden, and L. Norikane, "Calibrated imaging radar polarimetry: Technique, examples, and applications," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 6, pp. 942–961, 1991.
- [Zhao 12] Q. Zhao and R. H. Lang, "Fresnel double scattering from tree branches," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 10, pp. 3640–3647, 2012.

A Abkürzungen, Variablen und Symbole

A.1 Abkürzungen und Akronyme

AIRSAR	flugzeuggestütztes SAR-System (JPL)
BSA	<i>backscatter alignment</i>
BiCGSTAB	<i>biconjugate gradient stabilized method</i>
C++	objektorientierte Programmiersprache
CH1903	Referenzsystem der Schweizer Landeskoordinaten (Landesvermessung 1903)
DDA	<i>discrete dipole approximation</i>
DDSCAT	Freie DDA-Software
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EM	elektromagnetisch
ESA	<i>European Space Agency</i>
E-SAR	<i>experimental SAR</i> , flugzeuggestütztes SAR-System (DLR)
FDTD	<i>finite difference time domain</i>
FSA	<i>forward scattering alignment</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LOS	<i>line of sight</i>
LAPACK	<i>linear algebra package</i>
Laser	<i>light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LiDAR	<i>light detection and ranging</i>
L-System	Lindenmayer-System
MIMICS	<i>Michigan Microwave Canopy Scattering model</i>
MoM	<i>method of moments</i>

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PolInSAR	<i>polarimetric SAR interferometry</i>
PolSAR	<i>polarimetric SAR</i>
PRF	Pulsrepetitionsfrequenz
quad-Pol	voll polarimetrisches <i>SAR</i> -System mit vier Kanälen
Radar	<i>radio detecting and ranging</i>
RCS	<i>radar cross section</i>
RN	Geländeneigung in <i>range</i>
RT	<i>radiative transfer</i>
SAR	<i>synthetic aperture radar</i>
SIR-C	<i>Shuttle Imaging Radar System C</i>
SLC	<i>single look complex</i>
TEC	<i>total electron content</i>
VTEC	<i>vertical total electron content</i>
VHF	<i>very high frequency</i>
WGS-84	<i>world geodetic system 1984</i>

TAB. A.1: Abkürzungen und Akronyme

A.2 Variablen und Symbole

Variable/Symbol	Bedeutung
<i>Matrizen, Tensoren und Dyaden</i>	
$\bar{\alpha}$	Polarisierbarkeitstensor [$\text{C m}^2 \text{V}^{-1}$]
$\bar{\bar{A}}$	Dyade / Tensor in der DDA
$\bar{\bar{I}}$	Identitätsdyade
$\bar{\bar{L}}$	<i>self term</i> -Dyade
\bar{r}	Tensor der Reflexionskoeffizienten
$\bar{\bar{Z}}$	Dyade / Tensor in der DDA
$\bar{\bar{G}}$	Dyadische Green-Funktion
$[N]$	Rausch-Matrix
$[R]$	Verzerrungsmatrix für den Empfang
$[S]$	gemessene Streumatrix
$[\Sigma]$	kalibrierte Streumatrix
$[T]$	Verzerrungsmatrix für das Senden
$[U]$	Transformationsmatrix
$[C_3]$	Kovarianzmatrix
$[T_3]$	Kohärenzmatrix
$[U_3]$	Eigenvektormatrix
$[\Lambda_3]$	Eigenwertmatrix
<i>Vektoren</i>	
\bar{B}	magnetische Flussdichte [T]
\bar{b}	allgemeiner Vektor
\bar{D}	elektrische Flussdichte [A s m^{-2}]
\bar{E}	elektrische Feldstärke [V m^{-1}]
\bar{e}_p, \bar{e}_q	allgemeine Einheitsvektoren eines Vektorraumes
$\bar{e}_x, \bar{e}_y, \bar{e}_z$	Einheitsvektoren der kartesischen Koordinaten

\bar{E}^{inc}	einfallendes elektrisches Feld [V m ⁻¹]
\bar{H}	magnetische Feldstärke [A m ⁻¹]
\bar{h}	horizontaler Einheitsvektor
\bar{J}	Stromdichte [A m ⁻²]
\bar{k}	Wellenzahlvektor [m ⁻¹]
\bar{k}_i	Wellenzahlvektor einfallende Welle [m ⁻¹]
\bar{k}_s, \bar{k}_r	Wellenzahlvektor gestreute Welle [m ⁻¹]
\bar{p}	Polarisationsvektor [C m]
\bar{r}	Ortsvektor [m]
\bar{R}	Abstandsvektor [m]
\bar{r}	Ortsvektor [m]
$\bar{s}()$	Signalfunktion (vektoriell)
\bar{v}	vertikaler Einheitsvektor
\bar{v}	Geschwindigkeit [m s ⁻¹]
<i>Skalare und skalare Funktionen (lateinische Symbole)</i>	
a	Radius [m]
A	Anisotropie (Parameter der inkohärenten Dekomposition)
A	Amplitude [V m ⁻¹]
a_0, b_0	Regressionskoeffizienten
$a()$	Funktion
B	Gesamtbiomasse pro Fläche [m ³ ha ⁻¹]
b	Einzelbaumbiomasse [m ³]
B_{fm}	<i>chirp</i> -Bandbreite [Hz]
B_t	<i>range</i> -Bandbreite [Hz]
B_u	Azimutbandbreite [Hz]
$c_{1,2}$	Modellkonstanten (Änderung der Ausdünnung)
c_{light}	Lichtgeschwindigkeit [m s ⁻¹]
C	Matrix der Koeffizienten

$C()$	Funktion
d	Ausdünnungskoeffizient
D_u	Azimutauflösung [m]
D_x, D_y, D_z	Teilausdruck für den Polarisierbarkeitstensor [m ²]
e	Eulersche Zahl
f	Frequenz [Hz]
f	Rückstreuparameter
f_c	Mittenfrequenz [Hz]
f_s	<i>sampling</i> -Frequenz [Hz]
$f()$	Funktion
$F()$	allgemeine Funktion
g	Grad
$g()$	Funktion
H	Entropie (Parameter der inkohärenten Dekomposition)
h, v	Index für horizontal bzw. vertikal
i	imaginäre Einheit
i, j	Indizes
K	Konstante
k	Wellenzahl [m ⁻¹]
k_{inst}	instantane Wellenzahl [m ⁻¹]
k_z	z-Komponente der Wellenzahl [m ⁻¹]
l	Länge [m]
L_x, L_y, L_z	Teilausdruck für den Polarisierbarkeitstensor
M	Rotationsmatrix
N	Anzahl
p	Index, Kanal
P	Leistung [W]
$psf()$	<i>point spread function</i>

p, q	Indizes eines zweidimensionalen Vektorraumes
r	Index für reflektierte Welle
R	Korrelation
r	Norm des Ortsvektors [m]
r	Einzelbaumreflexion
r_{corr}	Korrekturfaktor für die Reflexionskoeffizienten
r_{\perp}	Reflexionskoeffizient senkrechte Polarisierung
r_{\parallel}	Reflexionskoeffizient parallele Polarisierung
R^2	Bestimmtheitsmass
s	Index für gestreute Welle
$s()$	Signalfunktion
s_{rough}	Rauigkeit, Standardabweichung der Oberfläche [m]
sinc	sinc-Funktion
t	Zeit [s]
T_p	Pulsdauer [s]
u	Azimet-Koordinate [m]
u	Position auf der y-Koordinate [m]
V	Volumen [m ³]
x, y, z	kartesische Koordinaten [m]
<i>Skalare und skalare Funktionen (griechische Symbole)</i>	
α	Parameter der inkohärenten Dekomposition
α_{chirp}	<i>chirp</i> -Rate [s ⁻²]
$\alpha_{ix,iy,iz}$	Teilausdruck für den Polarisierbarkeitstensors [C m ² V ⁻¹]
β^0	über die <i>slant range</i> -Pixelfläche normalisierte Rückstreuung [dB]
$\Gamma()$	Antennendiagramm
γ^0	über die Fläche senkrecht zur Beleuchtungsrichtung normalisierte Rückstreuung [dB]
Δt	Zeitunterschied [s]

Δu	Schrittweite in Azimut zwischen <i>echos</i> [m]
δ	markiert relative Grösse
δ_a	Öffnungswinkel der Antenne [rad]
δV	Ausschlussvolumen [m ³]
ϵ_{ground}	relative Permittivität des Bodens
ϵ_0	elektrische Permittivität des Vakuums [A s V ⁻¹ m ⁻¹]
ϵ_r	relative Permittivität
θ	lokaler Einfallswinkel [rad]
θ'	lokaler Einfallswinkel im Boden-Reflexionspunkt [rad]
ϑ	Empfangszeit [s]
$\kappa()$	Funktion
λ	Wellenlänge [m]
μ_0	magnetische Feldkonstante (Vakuum) [N A ⁻²]
μ_r	relative magnetische Permittivität
π	Kreiszahl
ρ	Ladungsdichte [A s m ⁻³]
ρ	komplexes Polarisationsverhältnis
$\bar{\varrho}$	Distanzvektor [m]
ϱ	Distanz [m]
σ	Rückstreuung (allgemeines Symbol)
σ	elektrische Leitfähigkeit [Ω^{-1} m ⁻¹]
σ^0	über die <i>ground range</i> -Pixelfläche normalisierte Rückstreuung [dB]
τ	Sendezeit [s]
φ	<i>squint</i> Winkel [rad]
ϕ	Phase [rad]
χ	Elliptizitätswinkel [rad]
χ_e	elektrische Suszeptibilität
χ_m	magnetische Suszeptibilität

χ^2	chi-Quadrat (Anpassungsgüte)
Ψ	Orientierungswinkel [rad]
Ω	Faraday-Rotation [rad]
ω	Kreisfrequenz [s ⁻¹]
ω^{inst}	instantane Kreisfrequenz [s ⁻¹]
ω_{cm}	modifizierte Kreisfrequenz [s ⁻¹]
<i>Operatoren</i>	
T	Transposition
\dagger	Adjunktion (komplex konjugierte Transposition)
∇	Nabla-Operator
$\frac{d}{dt}$	Differentialoperator (Ableitung nach t)
Σ	Summe
\int	Integral

TAB. A.2: Symbole und Variablen

B Anhang zu Kapitel 1

B.1 Herleitung der Grundlage der numerischen Simulation von Rückstreuprozessen

Die folgenden Herleitungen ergänzen KAPITEL 1.3.2 / S. 19.

Die EM-Welle wird als harmonische Schwingung betrachtet. Mit den Formulierungen als komplexe Zahlen $\bar{E} = \bar{E}_0 \cdot e^{-i\omega t}$ bzw. $\bar{H} = \bar{H}_0 \cdot e^{-i\omega t}$ können die Ableitungen nach der Zeit in den Maxwellgleichungen durchgeführt werden.

Unter Annahme eines paramagnetischen Mediums mit $\mu_r \approx 1$ können die Maxwellgleichungen für eine harmonische EM-Welle geschrieben werden als [Tsang 01]:

$$\nabla \times \bar{H} = -i\omega\epsilon_0\epsilon_r\bar{E} + \bar{J} \quad (\text{B.1})$$

$$\nabla \times \bar{E} = i\omega\mu_0\bar{H} \quad (\text{B.2})$$

$$\nabla \cdot \mu_0\bar{H} = 0 \quad (\text{B.3})$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0\epsilon_r\bar{E} = \rho \quad (\text{B.4})$$

wobei \bar{J} die Stromdichte im Medium bezeichnet. Aus der Anwendung des Operators $\nabla \times$ auf Gleichung (B.1) und unter Verwendung von (B.2) folgt die vektorielle Wellengleichung mit der Wellenzahl k [Tsang 01]:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} - k^2\bar{E} = i\omega\mu_0\bar{J} \quad (\text{B.5})$$

$$k^2 = \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r \quad (\text{B.6})$$

Aus dieser Wellengleichung werden Formulierungen abgeleitet, die die Interaktion einer EM-Welle mit Materie beschreiben. Auch die bei dieser Interaktion auftretende Rückstreuung, die

Grundbedingung für die aktive Fernerkundung ist, kann aus dieser Wellengleichung hergeleitet werden. Die Polarimetrie als Teilgebiet der *SAR*-Fernerkundung basiert auf der Orientierung der EM-Welle im Raum. Auch diese ist in der Wellengleichung enthalten. Als Polarisationsvektor der Welle gilt der Richtungsvektor des elektrischen Feldes \vec{E} . Eine Welle ist vollständig polarisiert, wenn die Richtung des elektrischen Feldvektors zu jedem Zeitpunkt und an jedem Raumpunkt vorhersehbar ist. Die von *SAR*-Sensoren erzeugte Strahlung ist in der Regel vollständig polarisiert. Demgegenüber tritt in der Natur elektromagnetische Strahlung auf, deren Polarisationszustand entlang der räumlichen und zeitlichen Dimensionen zufällig ändert, diese Strahlung ist vollständig unpolarisiert. Dies ist z.B. für das direkte einfallende Sonnenlicht der Fall. Eine Überlagerung von vollständig polarisierten und vollständig unpolarisierten Wellen führt zur teilweisen Polarisierung. Das durch die Atmosphäre gestreute Sonnenlicht ist zunehmend polarisiert, je stärker der Einfallswinkel von der direkten Einstrahlungsrichtung abweicht.

Die folgende Herleitung stellt die formalistische Grundlage für das in dieser Arbeit verwendete Streumodell her. Ziel der folgenden Herleitung ist die Beschreibung der Rückstreuung als Folge der Interaktion einer EM-Welle mit Materie.

In einem ersten Schritt wird die Wellengleichung für den Fall betrachtet, in dem der Raum quellenfrei ist. Dies ist eine adäquate Beschreibung der Ausbreitung des *SAR*-Signals in einiger Entfernung vom Sensor. Vakuum, aber auch die Troposphäre, kann als quellenfrei betrachtet werden, für *spaceborne*-Systeme, deren Signal die Ionosphäre durchquert, trifft diese Beschreibung nicht für den gesamten Ausbreitungspfad des Signals zu. In quellenfreien Regionen mit $\vec{J} = 0$ wird die Wellengleichung zu [Tsang 01]:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0 \quad (\text{B.7})$$

Da die Welle ihren Ursprung in einer Quelle hat, wird nun in die Gleichung eine Quelle an einer beliebigen Ortskoordinaten \vec{r}' eingeführt. Nur in dieser infinitesimalen Quelle existiert eine Stromdichte, die Ursache für die EM-Welle ist. Die Dirac-Deltafunktion $\delta(\vec{r} - \vec{r}')$ beschreibt dieses Verhalten, indem die Funktion nur exakt für den Ort der Quelle den Wert 1 annimmt. Nun muss für die Wellengleichung eine Funktion des elektrischen Feldes \vec{E} gefunden werden, die die Gleichung erfüllt. Die dyadische Green-Funktion $\vec{\bar{G}}(\vec{r}, \vec{r}')$ des freien Raumes erfüllt diese Anforderung. Sie beschreibt das elektrische Feld an beliebigen Koordinaten $\vec{r} \neq \vec{r}'$. So kann

die Wellengleichung in eine Gleichung überführt werden, die sowohl die Freiraumausbreitung beschreibt als auch die ursächliche Quelle der EM-Welle beinhaltet [Tsang 01]:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') - k^2 \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{\bar{I}} \delta(\bar{r} - \bar{r}') \quad (\text{B.8})$$

mit der Einheitsdyade $\bar{\bar{I}}$. Die dyadische Green-Funktion ist definiert als [Tsang 01]:

$$\bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') = \left(\bar{\bar{I}} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) g(\bar{r}, \bar{r}') \quad (\text{B.9})$$

$$g(\bar{r}, \bar{r}') = \frac{e^{ik|\bar{r}-\bar{r}'|}}{4\pi |\bar{r} - \bar{r}'|} \quad (\text{B.10})$$

Die Faltung der Green-Funktion mit einer Quelle, der Stromdichte $\bar{J}(\bar{r}')$, ergibt das in den Raum abgestrahlte elektrische Feld. Für eine nicht-infinitesimale Quelle wird die Faltung über das gesamte Volumen der Quelle durchgeführt, in Integraldarstellung [Tsang 01]:

$$\bar{E}(\bar{r}) = i\omega\mu_0 \int \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') d\bar{r}' \quad (\text{B.11})$$

Die Stromdichte $\bar{J}(\bar{r}')$ kann mit der Polarisierung durch eine einfallende EM-Welle gleichgesetzt werden, unter natürlichen Bedingungen aktive Quellen vernachlässigt werden können. Unter Ausnutzung von [Tsang 01]:

$$\bar{J}(\bar{r}) = -i\omega\epsilon_0\chi_e(\bar{r})\bar{E}(\bar{r}) \quad (\text{B.12})$$

folgt daraus die Volumenintegralgleichung [Tsang 01]:

$$\bar{E}(\bar{r}) = \bar{E}^{inc}(\bar{r}) + k^2 \int \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot (\epsilon_r(\bar{r}') - 1) \bar{E}(\bar{r}') d\bar{r}' \quad (\text{B.13})$$

$$k^2 = \omega^2\mu_0\epsilon_0 \quad (\text{B.14})$$

Diese Gleichung beschreibt das Huygens-Fresnel-Prinzip [Born 11].

B.2 Rückstreu-Konventionen *backscatter conventions*

Die folgenden Darstellungen sind eine Ergänzung zu KAPITEL 1.4.1 / S. 22.

In ABB. B.1 werden die beiden Konventionen der geometrischen Beschreibung von Rückstreuprozessen verdeutlicht. Die *forward scattering alignment (FSA)*-Konvention definiert das Koordinatensystem zur Beschreibung der gestreuten Welle anhand der Ausbreitungsrichtung der einfallenden sowie der gestreuten Welle. Der Einheitsvektor \bar{k} entspricht der jeweiligen Ausbreitungsrichtung der Welle. Üblicherweise werden zur Beschreibung der Lage des Ausbreitungsvektors zwei Winkel verwendet, der *off nadir*-Winkel θ und der *squint*-Winkel ϕ . Es gelten folgende Zusammenhänge und Definitionen, wobei der Index i für *incident*, also auf den Streuer einfallend, und die Indizes s *scattered* oder r *received* für die gestreute Welle stehen:

$$\bar{k}_i = \cos \phi_i \sin \theta_i \bar{e}_x + \sin \phi_i \sin \theta_i \bar{e}_y - \cos \theta_i \bar{e}_z \quad (\text{B.15})$$

$$\bar{h}_i = \bar{e}_z \times \bar{k}_i \quad (\text{B.16})$$

$$\bar{v}_i = \bar{h}_i \times \bar{k}_i \quad (\text{B.17})$$

Der Vektor \bar{k}_s zeigt in die Ausbreitungsrichtung der gestreuten Welle:

$$\bar{k}_s = -\bar{k}_i = \cos \phi_s \sin \theta_s \bar{e}_x + \sin \phi_s \sin \theta_s \bar{e}_y + \cos \theta_s \bar{e}_z \quad (\text{B.18})$$

$$\bar{h}_s = \bar{e}_z \times \bar{k}_s \quad (\text{B.19})$$

$$\bar{v}_s = \bar{h}_s \times \bar{k}_s \quad (\text{B.20})$$

In dieser Konvention entspricht die horizontale Polarisationsrichtung der gestreuten Welle der negativen der ausgesendeten. Da aber für monostatische *SAR*-Systeme dieselbe Antenne für Senden und Empfang genutzt werden kann, ist die Definition der *backscatter alignment (BSA)*-Konvention naheliegend. Unter Beibehaltung des Vektors für die einfallende Welle \bar{k}_i wird hier der Einheitsvektor der Ausbreitungsrichtung der gestreuten Welle \bar{k}_r so definiert, dass er gegen die physikalische Ausbreitungsrichtung der Welle orientiert ist und somit im monostatischen Fall identisch ist mit dem Vektor \bar{k}_i . Es folgt daraus:

$$\bar{k}_r = \bar{k}_i = -[\cos \phi_s \sin \theta_s \bar{e}_x + \sin \phi_s \sin \theta_s \bar{e}_y + \cos \theta_s \bar{e}_z] \quad (\text{B.21})$$

$$\bar{h}_r = \bar{e}_z \times \bar{k}_r \quad (\text{B.22})$$

$$\bar{v}_r = \bar{h}_s \times \bar{k}_r \quad (\text{B.23})$$

In beiden Konventionen ist die Konfiguration monostatisch, wenn:

$$\theta_s = \theta_r = \theta_i \quad (\text{B.24})$$

$$\phi_s = \phi_r = \pi + \phi_i \quad (\text{B.25})$$

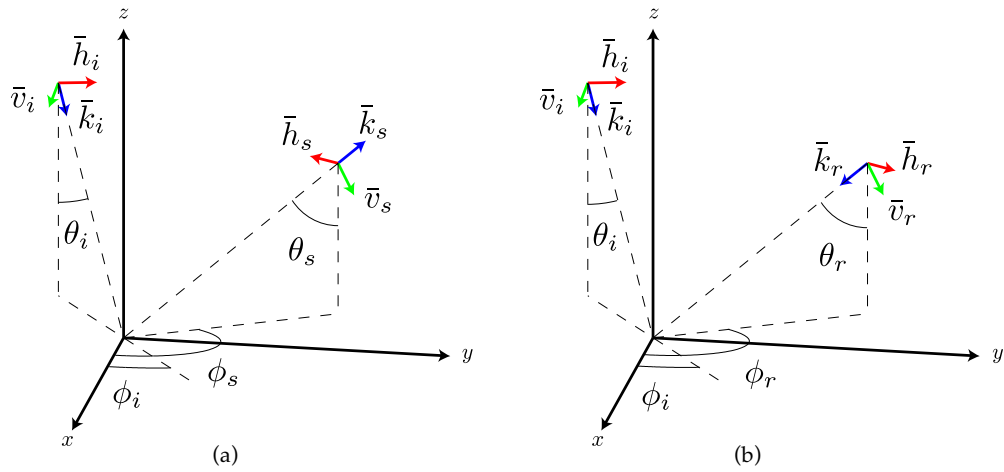


ABB. B.1: (a): *forward scattering alignment (FSA)*-Konvention, (b): *backscatter alignment (BSA)*-Konvention. Mod. nach [Ulaby 90a].

C Anhang zu Kapitel 2

C.1 Ionosphäreneffekte in der Simulation

Die folgenden Darstellungen Ergänzung KAPITEL 2.1.2 / S. 35 und zeigen die im *SAR*-Simulator berücksichtigten ionosphärischen Effekte.

Die freien Ladungen in der Ionosphäre interagieren mit den Feldern der elektromagnetischen Welle, was hauptsächlich zu folgenden Effekten führt:

1. Laufzeitverzögerung (*path delay*)
2. Verkürzung oder Verlängerung des *chirp*-Signals
3. Faraday-Rotation

Diese Effekte wurden im *SAR*-Simulator berücksichtigt.

C.1.1 Laufzeitverzögerung und *chirp*-Längenänderung

Die Laufzeitverzögerung (*path delay*) in der elektrisch aktiven Ionosphäre wird beschrieben durch [Hanssen 01]:

$$\Delta t_{\text{iono}} = \frac{K}{c} \cdot \frac{\text{TEC}}{f^2} \quad (\text{C.1})$$

$$\text{TEC} = \frac{\text{VTEC}}{\cos \theta} \quad (\text{C.2})$$

mit $\text{TEC} = \text{total electron content}$ entlang des Signalpfades, $\text{VTEC} = \text{vertical total electron content}$, $\theta = \text{off nadir-Winkel}$, $f = \text{Frequenz [Hz]}$ und $K = 40.28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-3}$. Die übliche Einheit für den VTEC ist [TECU] mit $1 \text{ TECU} = 10^{16}$.

Da die Laufzeitverzögerung abhängig ist von der Frequenz, entsteht beim frequenzmodulierten *chirp*-Signal eine Längenänderung. Hochfrequente Teile des Signals werden weniger stark

verzögert als die tieffrequenten Teile. Dies führt zu einer Verlängerung des Signals im Fall von *down chirp*-Signalen bzw. zu einer Verkürzung des Signals bei *up chirp*-Signalen. Durch die Längenänderung ändert sich auch die *chirp rate*, was sich bei der Prozessierung bemerkbar macht. Je nach Betrag der Längenänderung kann das Signal nicht mehr sauber fokussiert werden. In ABB. C.1 ist diese Auswirkung gezeigt.

C.1.2 Faraday-Rotation

Die Faraday-Rotation ist die Rotation des Polarisationsvektors um die *line of sight* LOS um einen Winkel Ω . Der Betrag des Drehwinkels ist abhängig vom *total electron content* TEC entlang des Signalpfades und vom Magnetfeld parallel zum Signalpfad B_{\parallel} . Der Drehwinkel wird durch folgende Formel geschätzt [Rignot 00], [Wright 03]:

$$\Omega = \frac{2.365 \cdot 10^4}{f^2} \cdot \text{TEC} \cdot B_{\parallel} \quad (\text{C.3})$$

Auf die gemessene Streumatrix $[S]$ wirkt sich die Faraday-Rotation wie folgt aus:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Sigma_{hh} & \Sigma_{hv} \\ \Sigma_{vh} & \Sigma_{vv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

wobei $[\Sigma]$ die Streumatrix ohne Faraday-Rotation bezeichnet.

Die oben gezeigten Effekte wurden in die Simulationssoftware integriert. Inputparameter für die Simulation sind TEC sowie das parallele Magnetfeld oder direkt der Winkel der Faraday-Rotation. Die Resultate einer Simulation einer idealen Kugel sind in ABB. C.2 und ABB. C.3 zusammengefasst. Das simulierte System entspricht einem hypothetischen satellitengetragenen P-Band-System mit der für flugzeuggestützte Systeme typischen Bandbreite von 100 MHz (realistischer wären $B \approx 6$ MHz, die höhere Bandbreite illustriert die Effekte besser). Der Wert der Faraday-Rotation wurde auf $\Omega = 30^\circ$ gesetzt, was für das P-Band einem tiefen Wert entspricht [Jehle 09]. Deutlich tritt in den simulierten Daten auch für diesen Wert die *chirp*-Längenänderung sowie die Laufzeitverzögerung zu Tage.

Die Nullfrequenz der demodulierten Daten liegt zwar in der Mitte des verzögerten und verlängerten *chirp*, jedoch unterscheidet sich die *chirp rate* von der Simulation ohne Atmosphäre.

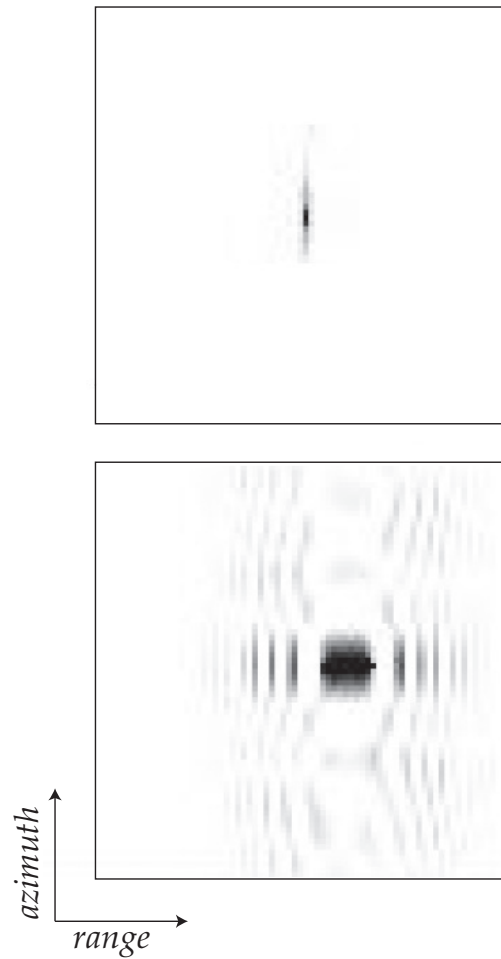


ABB. C.1: Fokussierung mittels *chirp scaling*. Simulation einer idealen Kugel, hypothetisches P-Band-System mit $f_c = 350$ MHz und $B = 100$ MHz, links: *near range*. Oben: ohne Ionosphäre, unten: mit Ionosphäre. Deutlich wird einerseits die Laufzeitverzögerung, die sich als grössere Entfernung zeigt, sowie die mangelnde Fokussierung als Folge der Längenänderung des *chirp*-Signals.

Dieser Veränderung der *chirp rate* muss Rechnung getragen werden, um die Daten fokussieren zu können.

Die Faraday-Rotation zeigt sich an der Abschwächung der kopolaren Kanäle zu Gunsten der neu auftretenden kreuzpolaren. Für polarimetrische Analysen muss dieser Effekt korrigiert werden, da sonst die Resultate stark verfälscht werden [Freeman 04].

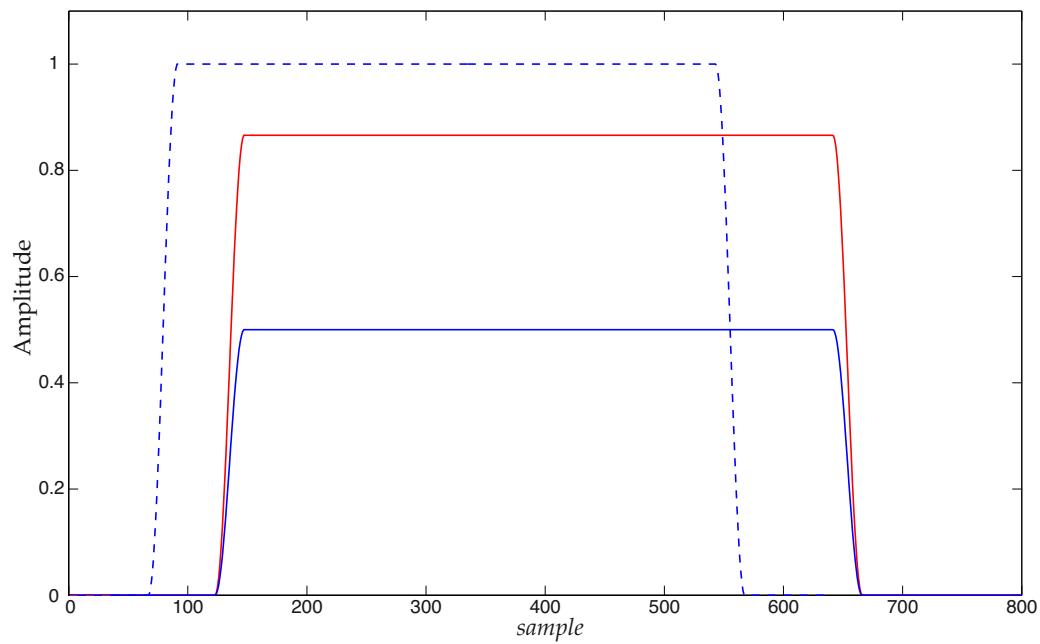


ABB. C.2: Längenänderung und Faraday-Rotation eines *down chirps*. Simulation einer idealen Kugel, hypothetisches P-Band-System mit $f_c = 350$ MHz und $B = 100$ MHz. Die Faraday-Rotation wurde mit $\Omega = 30^\circ$ simuliert. Blau: kopolare Kanäle, rot: kreuzpolare Kanäle. Ausgezogen: mit Ionosphäre, gestrichelt: ohne Ionosphäre. Ohne Ionosphäre weist die Kugel keine Rückstreuung im kreuzpolaren Kanal auf.

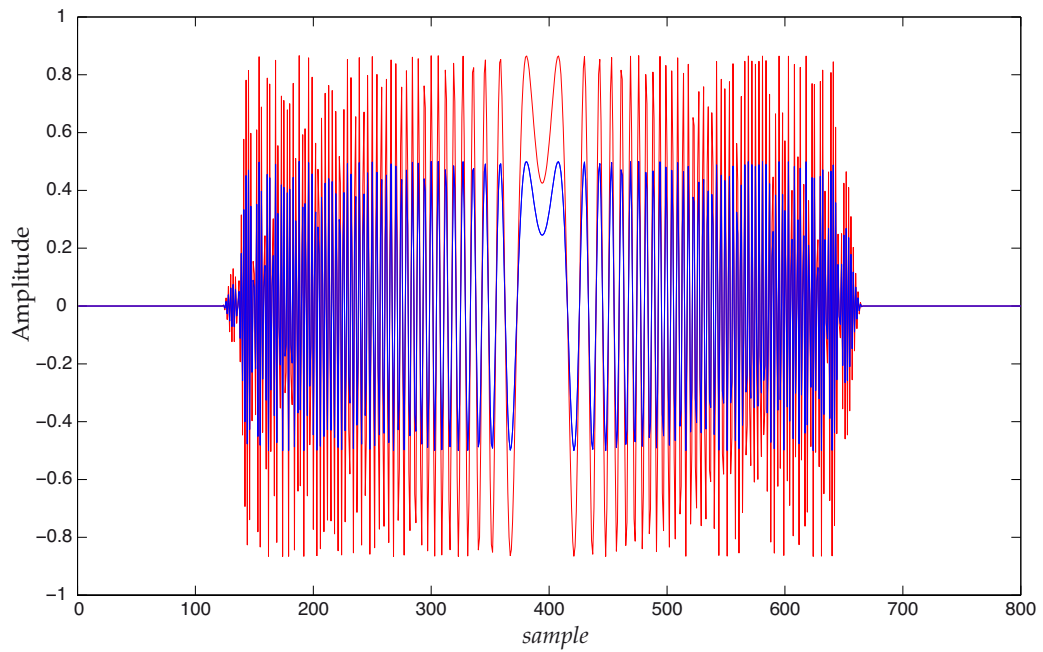


ABB. C.3: Demodulation eines *down chirps* nach Durchgang durch die Ionosphäre. Simulation einer idealen Kugel, hypothetisches P-Band-System mit $f_c = 350$ MHz und $B = 100$ MHz. Die Faraday-Rotation wurde mit $\Omega = 30^\circ$ simuliert. Blau: kopolare Kanäle, rot: kreuzpolare Kanäle. Die Nullfrequenz liegt auch nach Durchgang durch die Ionosphäre in der Mitte des Signals.

C.2 Herleitung der Grundgleichung der DDA

Diese ausführlicheren Herleitungen ergänzen die Darstellung in KAPITEL 2.1.3 / S. 41.

Ausgangspunkt der *discrete dipole approximation* (DDA) ist das aus den Maxwell-Gleichungen hergeleitete Volumenintegral (1.13).

Das rückstreuende Objekt entspricht einem Volumen V , das in homogene Volumenelemente V_p zerlegt werden kann. Jedes Volumenelement V_p kann durch ein äusseres elektrisches Feld polarisiert werden. Diese Polarisierung führt zu einer Rückstreuung des Gesamtvolumens V als Addition der Rückstreuung der diskreten Volumenelemente V_p . Die Prämisse der DDA verlangt dielektrisch homogene Eigenschaften innerhalb eines diskreten Dipols.

Der Integrand in (1.13) ist ungleich Null wenn die Quelle innerhalb des Volumenelementes V_p mit $\epsilon_r \neq 1$ liegt. Das bedeutet, dass die Integration auf V begrenzt werden kann. Die dyadische Green-Funktion hat aber bei $\bar{r} = \bar{r}'$, in der Quelle selbst, eine Singularität. Daher wird das Volumenintegral in (1.13) neu formuliert, indem ein Ausschlussvolumen δV eingeführt wird. Die Integration wird über das Volumen V ohne δV ($V \setminus \delta V$) durchgeführt. Das Ausgeschlossene Volumen δV wird in Form von zwei Termen $M(\delta V, \bar{r})$ und $\bar{\bar{L}}(\delta V, \bar{r})$ berücksichtigt:

$$\begin{aligned}\bar{E}(\bar{r}) &= \bar{E}^{\text{inc}}(\bar{r}) \\ &+ k^2 \int_{(V \setminus \delta V)} d\bar{r}' \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \chi_e(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \\ &+ M(\delta V, \bar{r}) - \bar{\bar{L}}(\delta V, \bar{r}) \chi_e(\bar{r}) \bar{E}(\bar{r})\end{aligned}\tag{C.5}$$

wobei M ein Integralausdruck des Ausschlussvolumens δV darstellt. Die Dyade $\bar{\bar{L}}$ wird als *self term dyadic* bezeichnet und beschreibt die Polarisierbarkeit der Quelle.

Diese Gleichung (C.5) kann numerisch gelöst werden, indem das Integral durch eine Summation über N diskrete, nicht-infinitesimale Volumenelemente ΔV_j , den diskreten Dipolen, ersetzt wird. Das Feld an der Position eines Einzelstreuers an Punkt $\bar{r}_i = [x_i, y_i, z_i]$ mit $\bar{r} = \bar{r}_i$ wird durch die folgende diskretisierte Gleichung dargestellt:

$$\begin{aligned}
\bar{E}(\bar{r}_i) &= \bar{E}^{\text{inc}}(\bar{r}_i) \\
&+ k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_{\Delta V_j} d\bar{r}_j \bar{G}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \cdot \chi_e(\bar{r}_j) \bar{E}(\bar{r}_j) \\
&+ M(\Delta V_i, \bar{r}_i) - \bar{L}(\Delta V_i, \bar{r}_i) \chi_e(\bar{r}_i) \bar{E}(\bar{r}_i)
\end{aligned} \tag{C.6}$$

Die *discrete dipole approximation* (DDA) ist insofern eine Approximation, dass die Polarisierbarkeit eines Einzelstreuers als konstant angesehen wird wie auch das polarisierende Feld im Volumen des Einzelstreuers. Diese Approximation wird erreicht, indem folgende Annahmen getroffen werden:

- Das totale Feld im ganzen Einzelstreuer i ist konstant und gleich wie das totale Feld im Punkt mit Ortsvektor \bar{r}_i :

$$E_i = E(\bar{r}_i) \tag{C.7}$$

- das selbe gilt für das einfallende Feld:

$$E_i^{\text{inc}} = E^{\text{inc}}(\bar{r}_i) \tag{C.8}$$

- die dielektrischen Eigenschaften des Einzelsstreuers sind homogen:

$$\chi_i = \chi_e(\bar{r}_i) \tag{C.9}$$

$$\bar{L}_i = \bar{L}(\Delta V_i, \bar{r}_i) \tag{C.10}$$

- Durch diese Annahmen kann das Integral gelöst werden:

$$\int_{\Delta V_j} d\bar{r}_j \bar{G}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \cdot \chi(\bar{r}_j) \bar{E}(\bar{r}_j) = \Delta V_j \bar{G}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \chi_j \bar{E}_j \tag{C.11}$$

– Der Term $M(\Delta V_i, \bar{r}_i)$ kann vereinfacht werden, wobei $\bar{\bar{I}}$ die Einheitsdyade darstellt:

$$M(\Delta V_i, \bar{r}_i) = \bar{\bar{M}}_i \cdot \chi_i \bar{E}_i \quad (\text{C.12})$$

$$\bar{\bar{M}}_i = \int_{\Delta V_i} d\bar{r}' (\bar{\bar{G}}(\bar{r}_i, \bar{r}') - \bar{\bar{G}}^s(\bar{r}_i, \bar{r}')) \quad (\text{C.13})$$

$$\bar{\bar{G}}^s(\bar{r}_i, \bar{r}') = \nabla \nabla \frac{1}{|\bar{r}_i - \bar{r}'|} = -\frac{1}{|\bar{r}_i - \bar{r}'|^3} \left(\bar{\bar{I}} - 3 \frac{(\bar{r}_i - \bar{r}') (\bar{r}_i - \bar{r}')^T}{|\bar{r}_i - \bar{r}'|^2} \right) \quad (\text{C.14})$$

Anschliessend kann die grundlegende Integralgleichung neu geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i &= \bar{E}_i^{\text{inc}} + k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Delta V_j \bar{\bar{G}}(r_i, r_j) \chi_j \bar{E}_j + \\ &\quad (\bar{\bar{M}}_i - \bar{\bar{L}}_i) \chi_i \bar{E}_i \end{aligned} \quad (\text{C.15})$$

Indem die Terme ausserhalb der Summation zusammengefasst werden, kann ein anregendes Feld (*exciting field*) wie folgt definiert werden:

$$\bar{E}_i^{\text{exc}} = (\bar{\bar{I}} + (\bar{\bar{L}}_i - \bar{\bar{M}}_i) \chi_i) \bar{E}_i \quad (\text{C.16})$$

$$\bar{E}_i^{\text{exc}} = \bar{E}_i^{\text{inc}} + k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Delta V_j \bar{\bar{G}}(r_i, r_j) \chi_j \bar{E}_j \quad (\text{C.17})$$

Die Einführung des Tensors $\bar{\bar{\alpha}}_i$ (*polarizability tensor*):

$$\bar{\bar{\alpha}}_i = \Delta V_i \chi_i (\bar{\bar{I}} + (\bar{\bar{L}}_i - \bar{\bar{M}}_i) \chi_i)^{-1} \quad (\text{C.18})$$

erlaubt die Definition des Polarisationsvektors (*polarization vector*) \bar{p}_i :

$$\bar{p}_i = \bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{exc}} = \Delta V_i \chi_i \bar{E}_i \quad (\text{C.19})$$

Aus Gründen der vereinfachten Notation ist es nützlich, eine Dyade $\bar{\bar{A}}$ zu definieren mit $\bar{\varrho} = \bar{r}_i - \bar{r}_j$ und $\varrho = |\bar{r}_i - \bar{r}_j|$:

$$\begin{aligned}
\bar{\bar{A}}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) &= -k^2 \bar{\bar{G}}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \\
&= \frac{e^{ik\varrho}}{4\pi\varrho^3} \left\{ k^2 (-\varrho^2 \bar{\bar{I}} + \bar{\varrho} \bar{\varrho}) \right. \\
&\quad \left. + \frac{(1 - ik\varrho)}{\varrho^2} (\varrho^2 \bar{\bar{I}} - 3\bar{\varrho} \bar{\varrho}) \right\}
\end{aligned} \tag{C.20}$$

Mit diesen Definitionen kann die diskretisierte Gleichung in der folgenden einfachen Form geschrieben werden, wenn die Gleichung mit dem *polarizability tensor* $\bar{\bar{\alpha}}$ multipliziert wird:

$$\bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{exc}} = \bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{inc}} + \bar{\bar{\alpha}}_i k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Delta V_j \bar{\bar{G}}(r_i, r_j) \chi_j \bar{E}_j \tag{C.21}$$

$$\bar{p}_i = \bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{inc}} + \bar{\bar{\alpha}}_i k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \bar{\bar{G}}(r_i, r_j) \cdot \bar{p}_j \tag{C.22}$$

$$\bar{\bar{\alpha}}_i \bar{E}_i^{\text{inc}} = \bar{p}_i + \bar{\bar{\alpha}}_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \bar{\bar{A}}(\bar{r}_i, \bar{r}_j) \cdot \bar{p}_j \tag{C.23}$$

C.3 Polarisierbarkeitstensor eines zylindrischen Dipols

Die Darstellung des Polarisierbarkeitstensors $\bar{\bar{\alpha}}_i$ für einen zylindrischen Dipol nach [Tsang 01] ergänzt KAPITEL 2.1.3 / S. 41.

Der Tensor $\bar{\bar{\alpha}}_i$ in (2.27) beschreibt die Polarisierbarkeit des zylindrischen Einzelstreuers mit Volumen ΔV entlang einer beliebigen Richtung durch die Terme $\beta_{ix} \dots \beta_{iz}$. In Erweiterung der bestehenden Formulierung wurde die unterschiedliche Polarisierbarkeit des Holzes durch unterschiedliche elektrische Permittivitäten berücksichtigt. Entlang der Wuchsrichtung entspricht die Permittivität ϵ_{\parallel} , quer dazu ϵ_{\perp} . Die Wuchsrichtung wurde entlang der z -Achse angenommen.

$$\bar{\bar{\alpha}}_i = \alpha_{ix} \bar{e}_x \bar{e}_x^T + \alpha_{iy} \bar{e}_y \bar{e}_y^T + \alpha_{iz} \bar{e}_z \bar{e}_z^T \quad (\text{C.24})$$

$$\Delta V = dx dy dz \quad (\text{C.25})$$

$$\alpha_{ix} = \frac{\epsilon_0 \Delta V}{1 + \chi_i (L_x - D_x k^2)} (\epsilon_{\perp} - 1) \quad (\text{C.26})$$

$$\alpha_{iy} = \frac{\epsilon_0 \Delta V}{1 + \chi_i (L_y - D_y k^2)} (\epsilon_{\perp} - 1) \quad (\text{C.27})$$

$$\alpha_{iz} = \frac{\epsilon_0 \Delta V}{1 + \chi_i (L_z - D_z k^2)} (\epsilon_{\parallel} - 1) \quad (\text{C.28})$$

Für Kreiszylinder mit Radius a und Länge l ergeben sich die zugehörigen Terme L_x , L_y und L_z aus der numerischen Integration über das Ausschlussvolumen. Details finden sich in [Tsang 01]:

$$\Delta V = \pi a^2 l \quad (\text{C.29})$$

$$L_x = L_y = \frac{l}{2\sqrt{(4a^2 + l^2)}} \quad (\text{C.30})$$

$$L_z = 1 - \frac{l}{\sqrt{(4a^2 + l^2)}} \quad (\text{C.31})$$

$$D_x = D_y = \frac{ika^2 l}{6} + \frac{l}{8} \left\{ \sqrt{l^2 + 4a^2} - l \right\} + \frac{a^2}{4} \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + 4a^2}}{2a} \right) \quad (\text{C.32})$$

$$D_z = \frac{ika^2 l}{6} + \frac{a^2}{2} \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + 4a^2}}{2a} \right) \quad (\text{C.33})$$

C.4 Anpassung der DDA an frequenzmodulierte Signale

Die folgenden Darstellungen sind eine Ergänzung zu KAPITEL 2.1.3 / S. 43 und illustrieren, weshalb eine Anpassung der *discrete dipole approximation* (DDA) notwendig ist, wenn direkt frequenzmodulierte Signale verwendet werden sollen.

Das einfallende Feld muss zu jedem Zeitpunkt und an jedem Raumpunkt mit der korrekten instantanen Wellenzahl berechnet werden, um die korrekte Phase zu erhalten. Das frequenzmodulierte *chirp*-Signal hat eine instantane Kreisfrequenz $\omega_i^{\text{inst}}(t)$:

$$\begin{aligned}\omega_i^{\text{inst}}(t) &= \frac{d}{dt}(\omega_{cm}\tau_i + \alpha_{\text{chirp}}\tau_i^2) \\ &= \omega_{cm} + 2\alpha_{\text{chirp}}\tau_i\end{aligned}\tag{C.34}$$

mit der zugehörigen instantanen Kreiswellenzahl $k_i(t)$:

$$k_i(t) = (\omega_{cm} + 2\alpha_{\text{chirp}}\tau_i)/c\tag{C.35}$$

In einem frequenzmodulierten Szenario werden alle Terme in der DDA, die Kreisfrequenz oder Wellenzahl beinhalten, zeitabhängig. Dies betrifft die folgenden Terme:

$$\bar{\bar{A}}_{ij} \rightarrow \bar{\bar{A}}_{ij}(k_i(t))\tag{C.36}$$

$$\bar{\bar{\alpha}}_i \rightarrow \bar{\bar{\alpha}}_i(k_i(t))\tag{C.37}$$

$$\bar{p}_i \rightarrow \bar{p}_i(t)\tag{C.38}$$

$$\bar{E}_i^{\text{inc}} \rightarrow \bar{E}_i^{\text{inc}}(t)\tag{C.39}$$

Diese Anpassungen erfassen das Problem jedoch nicht vollständig. Die zeitverzögerte Interaktion zwischen Dipolen in der DDA, die durch die Green-Funktion beschrieben wird, ist für die Behandlung konstanter Frequenzen (z.B. für optische Anwendungen) ausgerichtet. Im *SAR*-Fall stellt sich aber das Problem, dass Dipole gleichzeitig mit unterschiedlichen Frequenzen beleuchtet

werden. Einerseits vom direkten einfallenden Signal, andererseits vom zeitverzögerten Signal, das von anderen Dipolen ausgesendet wird und somit eine abweichende instantane Frequenz aufweist.

Die Formulierung der DDA nur mit zeitabhängigen Wellenzahlen zeigt offensichtliche Inkonsistenzen im Zeitargument, wie in der Folge anhand eines Beispiels zweier Dipole \bar{p}_i, \bar{p}_j illustriert wird:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_i(k_i(\tau_i))\bar{E}_i(\tau_i) &= \bar{I} \cdot \bar{p}_i(\tau_i) \\ &+ \bar{\alpha}_i(k_i(\tau_j - \delta_t))\bar{A}_{ij}(k_i(\tau_j - \delta_t)) \cdot \bar{p}_j(\tau_j)\end{aligned}\tag{C.40}$$

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_j(k_j(\tau_j))\bar{E}_j(\tau_j) &= \bar{I} \cdot \bar{p}_j(\tau_j) \\ &+ \bar{\alpha}_i(k_i(\tau_i - \delta_t))\bar{A}_{ji}(k_i(\tau_i - \delta_t)) \cdot \bar{p}_i(\tau_i)\end{aligned}\tag{C.41}$$

Die Zeit-Argumente von \bar{p}_i und der zugehörigen Dyade \bar{A}_{ji} (bzw. \bar{p}_j und \bar{A}_{ij}) stimmen nicht überein, was im Fall einer konstanten Frequenz nicht zu einem Problem führt, da der Propagationsterm $e^{ik\rho}$ in der Green-Funktion die Zeitverzögerung korrekt beschreibt.

Um das Problem zu illustrieren wird in ABB. C.4 und C.5 das durch die Green-Funktion berechnete Signal grafisch dargestellt. In den Grafiken wird jeweils die z -Komponente eines Signals beschrieben, das von einem Dipol ausgesendet wird, der durch eine harmonische EM-Welle polarisiert wird (in der Folge polarisierendes Signal genannt) und der gegenüber der Empfangsposition auf der x -Achse um ϱ verschoben ist. In den Grafiken wird die Freiraumdämpfung unterdrückt, die Signale sind normiert. Die gezeigten Frequenzen entsprechen einer typischen P-Band-Frequenz, die Bandbreite für das frequenzmodulierte Szenario wurde aber gegenüber realen SAR-Systemen stark erhöht und die Pulslänge stark verkleinert, um die Effekte deutlicher zu zeigen.

Das von einem Dipol abgestrahlte Feld im *near field* unterscheidet sich erheblich von dem im *far field*. Im *near field* treten induktive Rückkopplungen der bereits ausgesendeten EM-Welle mit dem Dipol auf, die eine Phasenverschiebung des ausgesendeten Signals gegenüber dem polarisierenden Signal bewirken. Bei zunehmender Entfernung verschwinden diese Rückkopplungseinflüsse, das polarisierende Signal und die polarisierende EM-Welle sind wieder in Phase. Von *far field* wird üblicherweise gesprochen, wenn $\varrho \gg 2\lambda$ [Born 11].

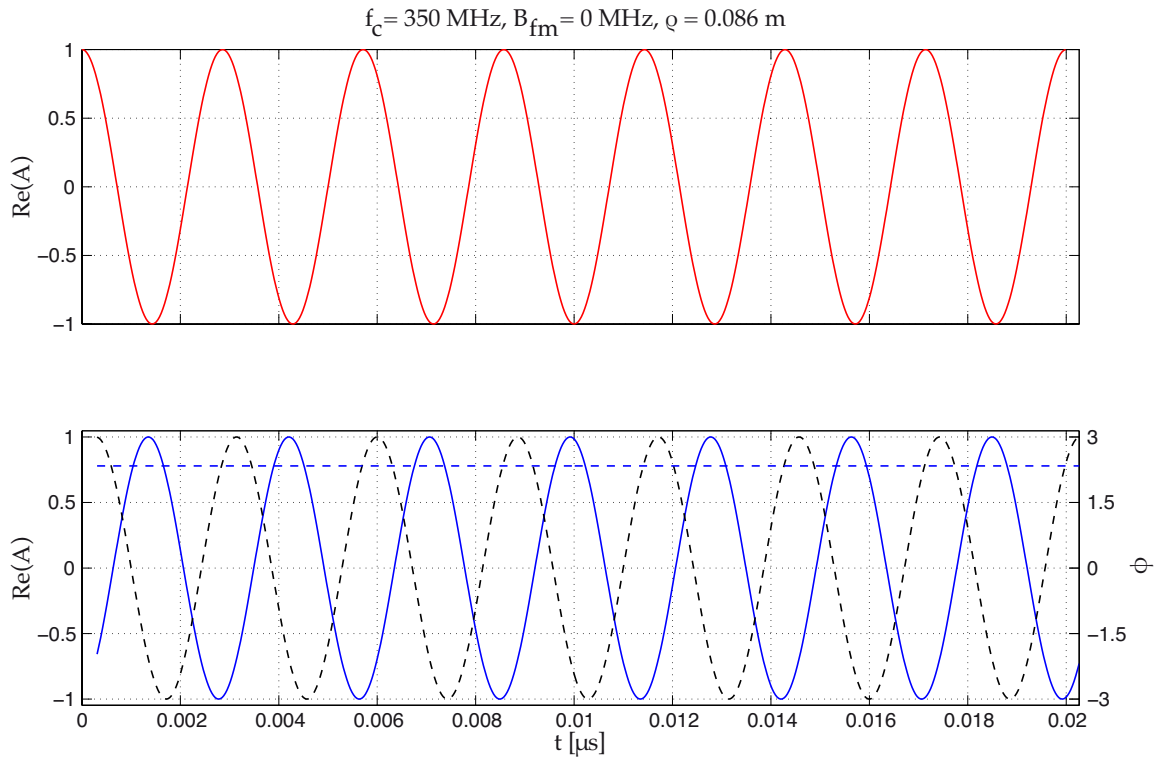


ABB. C.4: rot: polarisierendes P-Band-Signal mit konstanter Frequenz, blau: Signal im *near field*, Abstand 0.086 m von der Quelle, beschrieben durch die Green-Funktion, schwarz gestrichelt: zeitlich verschobenes polarisierendes Signal als Referenz. Deutlich wird die Phasenverschiebung im *near field* der ausgesendeten Welle gegenüber dem polarisierenden Signal.

In ABB. C.6 wird die Phasenverschiebung gegenüber dem polarisierenden Signal im *near field* deutlich. Bei zunehmender Entfernung gleicht sich das durch die Green-Funktion beschriebene Signal dem lediglich zeitverschobenen polarisierenden Signal an.

Da davon ausgegangen wird, dass die momentane Induktion eines Dipols, der durch eine Welle konstanter Frequenz polarisiert wird, sich nicht von der Induktion durch eine frequenzmodulierte EM-Welle mit derselben momentanen Frequenz unterscheidet, müsste die auf Frequenzmodulation angepasste Formulierung dieselbe entfernungsabhängige Phasenverschiebung für eine gegebene instantane Frequenz erzeugen.

Wie in ABB. 2.2 erkennbar ist, beschreibt die gemäss (C.36) - (C.39) angepasste Formulierung die Phasenverschiebung im *near field* zufriedenstellend. Im *far field* ist jedoch das berechnete Signal fehlerhaft, wie in ABB. 2.3 deutlich erkennbar ist. Die Erklärung ist, dass sich bei kleinen Abständen vom Dipol die momentane Frequenz nicht stark von der des polarisierenden Signals unterscheidet. Die Green-Funktion in ihrer ursprünglichen Formulierung beschreibt das Resultat nahezu mit der erwarteten Phasenbeziehung. Bei grösseren Abständen ist der Propagationsterm

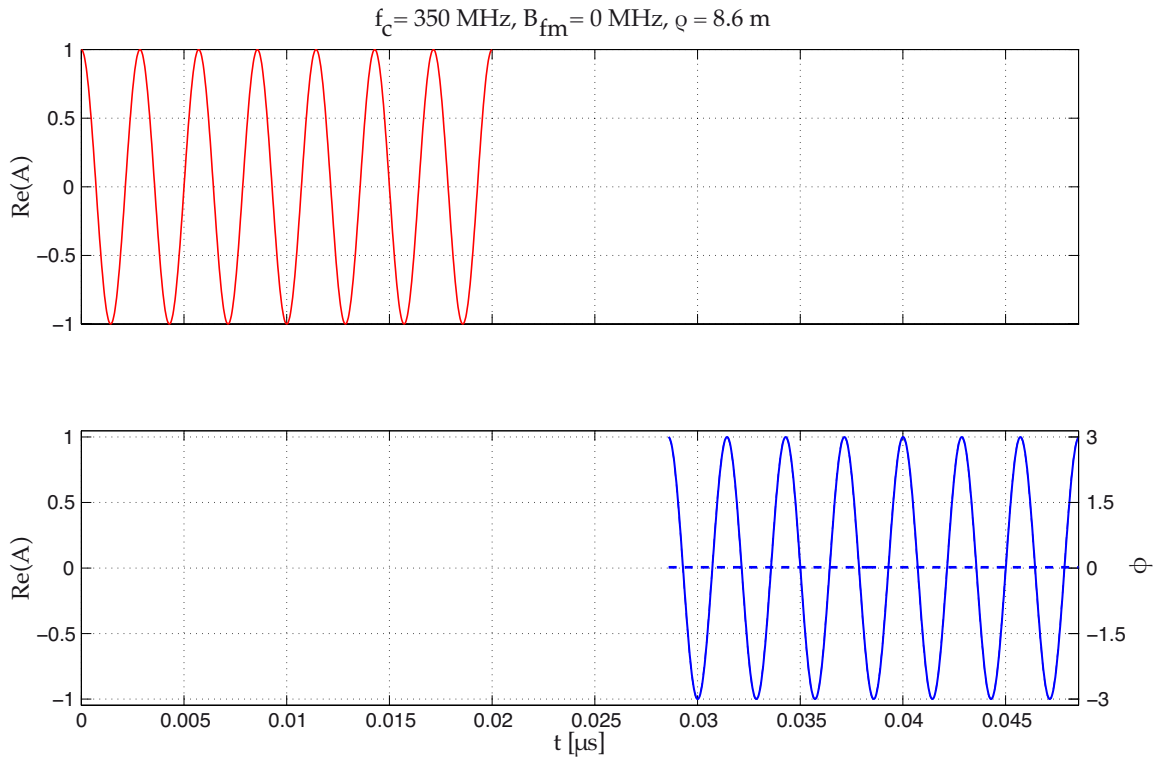


ABB. C.5: rot: polarisierendes P-Band-Signal mit konstanter Frequenz, blau: Signal im *far field*, Abstand 0.086 m von der Quelle, beschrieben durch die Green-Funktion, schwarz gestrichelt: zeitlich verschobenes polarisierendes Signal als Referenz. Signal im *far field* und zeitlich verschobenes polarisierendes Signal sind in Phase.

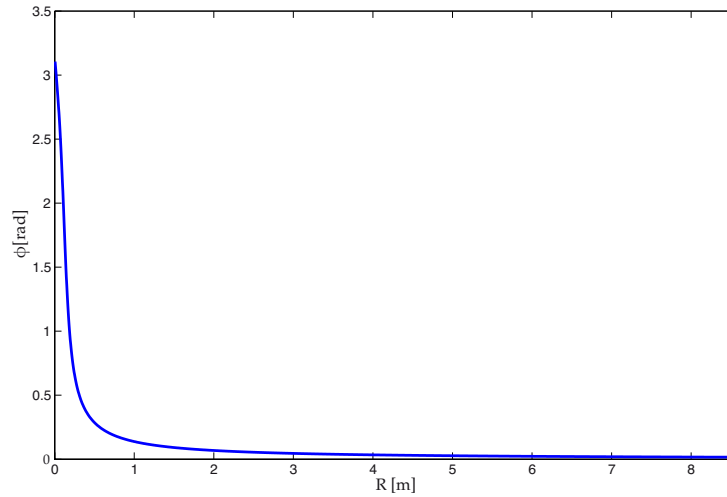


ABB. C.6: Phasenverschiebung eines von einem Dipol ausgesendeten P-Band-Signals gegenüber der polarisierenden EM-Welle in Abhängigkeit von der Entfernung.

$e^{ik\varrho}$ in der Green-Funktion jedoch keine zutreffende Beschreibung des frequenzmodulierten Signals mehr.

C.5 Der *thinning detector*

Die folgenden Darstellungen ergänzen KAPITEL 2.5.2 / S. 101, worin Methoden zur Schätzung des Ausdünnungsparameters d dargestellt werden.

Die Entwicklung des *thinning detectors* beruht auf einem idealisierten Szenario. In ABB. C.7 wird dieses dargestellt. Das Szenario umfasst einen Waldbestand, der zwölf Ausdünnungslinien beinhaltet, die demselben Ausdünnungsparameter d unterliegen. Jede Ausdünnungslinie wird mit 13 Stichproben beprobt. Über den Zeitpunkt der Stichproben wird für das idealisierte Szenario keine Aussage gemacht, aber eine Auswahl von einzelnen Stichproben entspricht einer Beprobung zu einem bestimmten Zeitpunkt. In den Grafiken sind die Ausdünnungslinien individuell eingefärbt; dies erleichtert, dieselbe Ausdünnungslinie in den verschiedenen Grafiken zu identifizieren.

Die erste Stichprobe aller zwölf Ausdünnungslinien entspricht einer Einzelbaumanzahl von 200 ha^{-1} , die Bestandes-Biomasse der ersten Linie entspricht $100 \text{ m}^3/\text{ha}$. Die folgenden Linien haben um jeweils $10 \text{ m}^3/\text{ha}$ erhöhte Ausgangs-Biomassen. Innerhalb einer Ausdünnungslinie (entspricht einem Bestand) beträgt das Inkrement der Bestandes-Biomasse von einer Stichprobe (entspricht einem *plot*) zur Nächsten $5 \text{ m}^3/\text{ha}$. Alle 13 Serien unterliegen demselben Ausdünnungskoeffizienten, hier $d = 0.9$. Die Einzelbaumrückstreuung r wurde in diesem idealisierten Szenario mit $r = 0.9$ beziffert. Die beiden Exponenten stimmen also überein, was zu einer konstanten Rückstreuung einer Ausdünnungslinie führen muss.

Aus der Grafik wird deutlich, dass eine bestimmte Bestandesbiomasse durch unterschiedliche Baumanzahlen mit unterschiedlicher Einzelbaumbiomasse erreicht werden kann. Diese unterschiedlichen Einzelbaumbiomassen für dieselbe Bestandesbiomasse haben auf die Rückstreuung einen erheblichen Einfluss, was ABB. C.8 zeigt. Obwohl alle drei Serien derselben Ausdünnungsdynamik unterliegen ($d = 0.9$) und somit eine konstante Rückstreuung zu erwarten wäre, unterscheidet sich die gemessene Rückstreuung zwischen erster und letzter Linie um annähernd 3 dB.

Das idealisierte Szenario macht deutlich, dass die Schätzung des Zusammenhangs zwischen Rückstreuung und Bestandesbiomasse stark abhängig ist vom Ausdünnungsparameter d einerseits und andererseits von der Anzahl verschiedener Ausdünnungslinien mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen im Bestand.

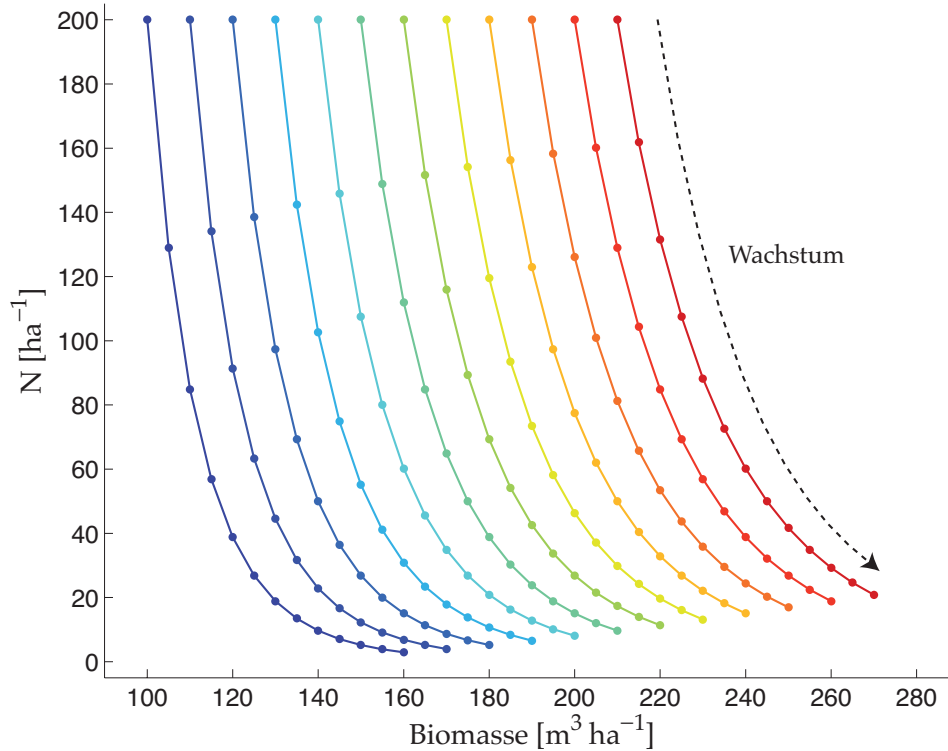


ABB. C.7: 12 Ausdünnungslinien, Ausgangs-Stammanzahl 200, $d = 0.9$. Die Farben dienen zur besseren Identifikation einzelner Ausdünnungslinien.

Das Verfahren beruht auf dem Spezialfall, dass der Ausdünnungskoeffizient d einen Wert annimmt, indem trotz ändernder Gesamtbiomasse B keine Änderung in der Rückstreuung gemessen werden kann («totale Sättigung»). Aus der Formel (2.116):

$$\delta\sigma = (\delta b)^r \cdot (\delta b)^{-d}$$

folgt, dass das dann der Fall ist, wenn der Ausdünnungskoeffizient denselben Wert annimmt wie die Einzelbaumrückstreuung r , also $d = r$:

In Formel (2.108):

$$10 \log_{10}(\sigma) = r \cdot 10 \log_{10}(B) - (r - 1) 10 \log_{10}(N) + c$$

bleibt die Rückstreuung konstant, wenn die Terme mit B und N gleich sind. In der Formel wird der Einfachheit halber r durch d ersetzt. Die Lösung für d entspricht aber nur dem Spezial-

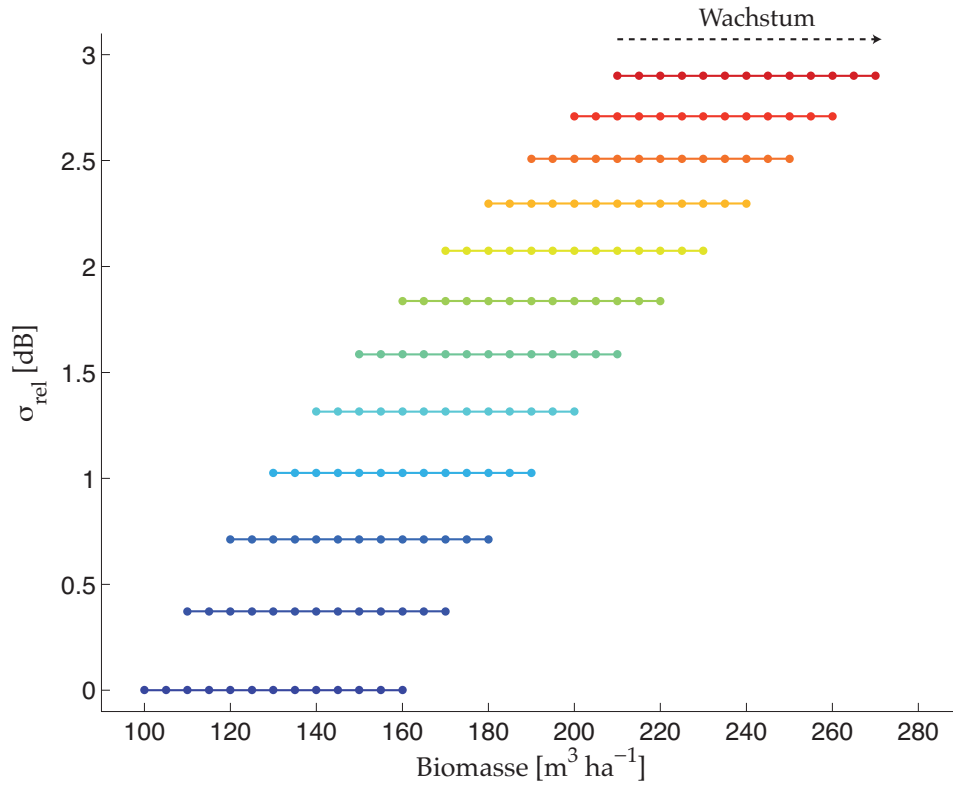


ABB. C.8: Idealisierte Rückstreuung mit *thinning*. Die Ausgangs-Stammanzahl beträgt 200 ha^{-1} . Variiert wird die Biomasse des Bestandes. Blau: $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, rot: $210 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Rückstreuungs-Exponent $r = 0.9$, Ausdünnungs-Koeffizient $d = 0.9$. Die Rückstreuung einer Ausdünnungslinie ist konstant. Die Farben dienen zur besseren Identifikation einzelner Ausdünnungslinien.

fall, in dem eine konstante Rückstreuung entlang einer Ausdünnungslinie beobachtet wird. Die Proportionalitätskonstante c wird hier nicht weiter benötigt.

$$10 \log_{10}(N) = \frac{d}{(d-1)} \cdot 10 \log_{10}(B) + c \quad (\text{C.42})$$

Gleichung (C.42) ermöglicht nun, *thinning*-Linien linear darzustellen, wenn der zu Grunde liegende d -Wert bekannt ist. In ABB. C.9 wird dies deutlich. Dafür wird als unabhängige Variable $x = \frac{d}{(d-1)} \cdot 10 \log_{10}(B)$ gewählt, als abhängige Variable $10 \log_{10}(N)$. Wenn der korrekte d -Wert bestimmt wurde, resultiert eine Gerade mit Steigung = 1.

Auch in dieser transformierten Form ist es immer noch nicht möglich, den d -Wert direkt mittels Regressionsmodellen zu schätzen, da immer noch mehrere parallele Linien nebeneinander denselben Wertebereich abdecken können. Ein Ansatzpunkt ist, dass im Fall der korrekten Bestimmung des Ausdünnungsparameters d die Steigung einer nach (C.42) transformierten *thin-*

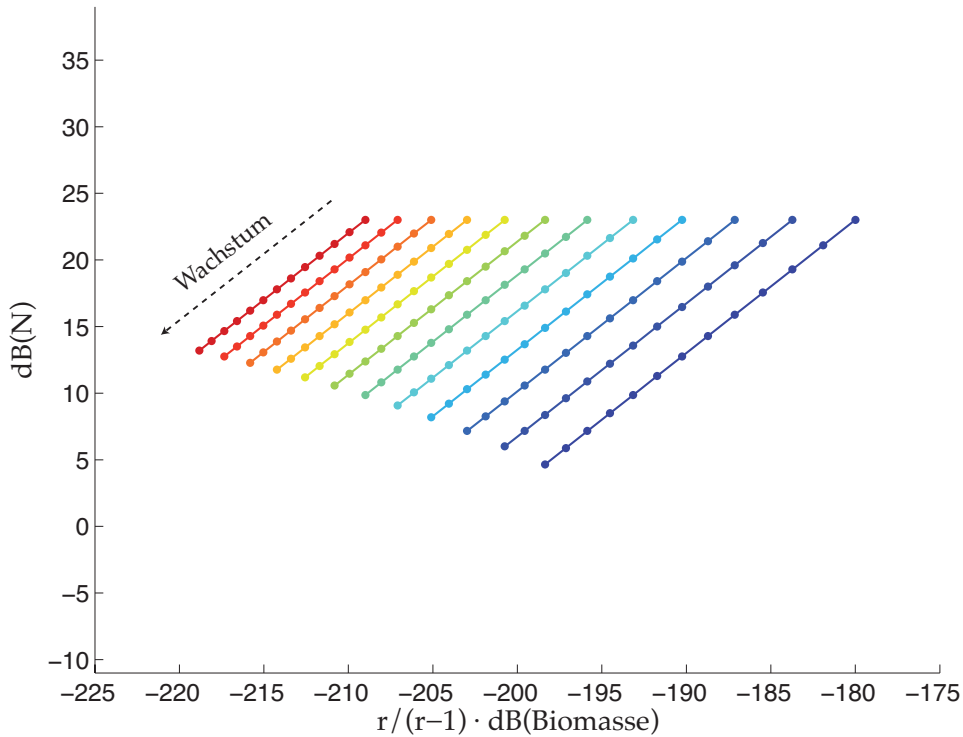


ABB. C.9: Linearisierte Ausdünnungslinien bei $r = d$. Die 12 *thinning*-Linien sind linear, parallel und haben die Steigung $m_{thinn} = 1$. Die Farben dienen zur besseren Identifikation einzelner Ausdünnungslinien.

ning-Linie = 1 ist. Dies kann zur Schätzung des d -Wertes genutzt werden, indem der optimale d -Wert iterativ bestimmt wird.

Für die Schätzung des d -Wertes wurde ein iterativer Algorithmus konstruiert, der hier *thinning detector* genannt wird. Die einzelnen Schritte des *thinning detector* sind folgende:

1. Ein Startwert für d wird gewählt.
2. Dadurch können die Stichproben in einer Ebene dargestellt werden, mit $x = r/(r - 1) \cdot 10 \log_{10}(B)$ und $y = 10 \log_{10}(N)$, vgl. (C.42).
3. Nun werden parallele Geraden mit einem festzulegenden Abstand $2 \cdot \epsilon$ und Steigung = 1 über die Ebene gelegt. Die Punkte, die einen bestimmten Abstand ϵ zu einer beliebigen Geraden unterschreiten, werden der durch die Gerade beschriebenen *thinning*-Linie zugerechnet. Es werden so viele Geraden über die Ebene gelegt, bis alle Punkte einer Geraden zugeordnet sind. Der ϵ -Wert sollte mit Bezug zur Streuung bezüglich der x-Achse festgelegt werden, da zu tiefe r -Werte zu einer Konzentration der Punkte in dieser Dimension führen. Als praktikabel hat sich die Festlegung von ϵ auf $1/20$ der Streuung in x -Richtung erwiesen.

4. Der d -Wert wird schrittweise variiert und die Punktzuteilung zu den Linien wiederholt.
5. Der d -Wert, bei welchem das Minimum an Geraden benötigt wird, um alle Punkte *thinning*-Linien zuzuschreiben, entspricht dem gesuchten Wert. Häufig tritt der Fall auf, dass mehrere Minima gefunden werden.
6. Daher wird zusätzlich zu diesem Kriterium ein zweites eingeführt. Die Anzahl Stichproben auf den beiden am stärksten besetzten Linien wird als Ladung bezeichnet. Dazu wird der prozentuale Anteil an Punkten berechnet, die den beiden am stärksten besetzten Linien zugeteilt wurden. Es wäre auch denkbar, die Ladung als alleiniges Entscheidungskriterium zu verwenden. In der Anwendung im Rahmen der Untersuchungen für diese Arbeit hat sich gezeigt, dass eine Kombination von Geradenminimum und Ladung am erfolgversprechendsten ist. Für die Bestimmung des d -Wertes hat das Minimum an benötigten Geraden Priorität. Wenn mehre Minima gefunden werden, entscheidet das Ladungsmaximum.
7. Wenn immer noch mehrere d -Werte gefunden werden, gilt das durch minimalen und maximalen gefundenen Wert definierte Intervall als Schätzung für den d -Wert.

In der Folge wird die Robustheit des *thinning detector*-Algorithmus gezeigt. Der Algorithmus soll auch in den Situationen eine valable Schätzung liefern, in denen die Ausdünnungsdynamik komplex ist. Dazu werden mit Hilfe der zwölf Ausdünnungslinien verschiedene Szenarien abgeleitet, die die Beprobung durch die Forstinventur nachempfinden sollen. Im Rahmen einer Forstinventur werden Stichprobenpunkte zufällig gewählt, z.B. an Gitterpunkten des Karten-Koordinatennetzes. Es wird also nicht nur einen Bestand mit einheitlichen Ausdünnungsparametern beprobt, sondern einzelne Stichproben in verschiedenen Ausdünnungslinien werden erhoben.

Anhand der zwölf idealisierten Ausdünnungslinien kann dies dargestellt werden. Aus den zwölf idealisierten Ausdünnungslinien wurden Punkte ausgewählt. Diese Punkte simulieren eine Inventur. Alle Punkte einer Inventur bilden eine «scheinbare Ausdünnungslinie».

Die scheinbaren Ausdünnungslinien haben, isoliert betrachtet, stark vom ursprünglichen Parameter $d = 0.9$ abweichende Verläufe. In ABB. C.11 ist die Auswahl von Stichproben-Punkten mit den daraus folgenden scheinbaren Ausdünnungslinien dargestellt.

Der *thinning detector* findet auch für dieses unübersichtliche Szenario als idealen Wert den ursprünglichen Wert $d = 0.9$, was in ABB. C.10 gezeigt wird.

Der *thinning detector* ist aber nicht in der Lage, eine einzelne scheinbare Ausdünnungslinie dem ursprünglichen Ausdünnungswert $d = 0.9$ zuzuordnen. So wird z.B. die in Grafik ABB. C.11

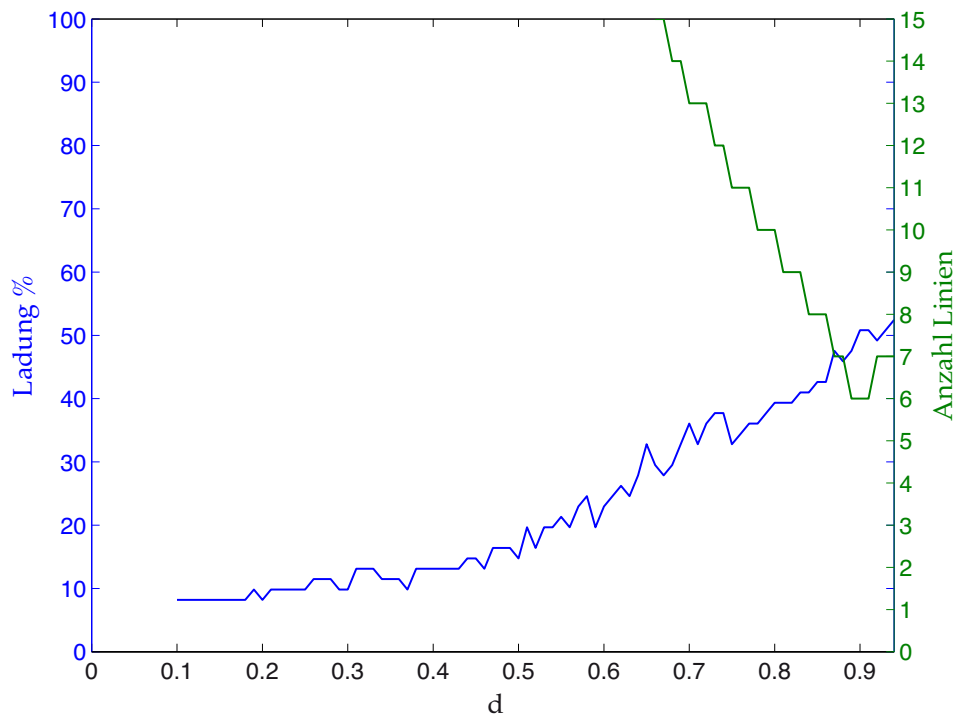


ABB. C.10: Iterativer *thinning detector*, angewandt auf die durch Auswahl entstandenen scheinbaren Ausdünnungslinien.

blau eingezeichneten Linie dem Wert $d = 0.7$ zugeordnet. In der Praxis stellt diese Situation aber kein grösseres Problem dar, da die Rückstreuung der scheinbaren Ausdünnungslinie eine Korrelation mit der Bestandesbiomasse aufweist, die einer Ausdünnungslinie mit $d = 0.7$ entspricht. Der d -Wert wurde somit in dem Sinn korrekt ermittelt, dass der Zusammenhang zwischen Rückstreuung und Biomasse erklärt werden kann, der gefundene d -Wert beschreibt aber den grundlegenden ökologischen Prozess der Ausdünnung für das Testgebiet nicht zutreffend.

Der Algorithmus erweist sich aber durchaus als robust. Werden aus dem ursprünglichen Szenario die beiden grünen Linien ausgewählt, die beide einer Situation ohne Ausdünnung entsprechen (konstante Stammanzahl), ermittelt der Algorithmus wieder den korrekten Wert $d = 0.9$.

Es ist zu erwarten, dass der *thinning detector* dann versagt, wenn wenige Stichproben aus vielen unterschiedlichen und weit voneinander entfernten Ausdünnungslinien vorliegen. Weiter wird für die Anwendung des Algorithmus angenommen, dass die Grundgesamtheit der Stichproben über einen konstanten Ausdünnungsparameter d verfügt, was zur Zeit nicht experimentell bestätigt ist.

Die erwartete Rückstreuung der so entstehenden scheinbaren Ausdünnungslinien wird in ABB. C.12 gezeigt. Aus dieser Grafik wird deutlich, dass eine Auswahl von Punkten aus verschiedenen Ausdünnungslinien annähernd beliebige Zusammenhänge zwischen Bestandesbiomasse und Rückstreuung erzeugen kann, z.B. auch eine deutlich negative Korrelation.

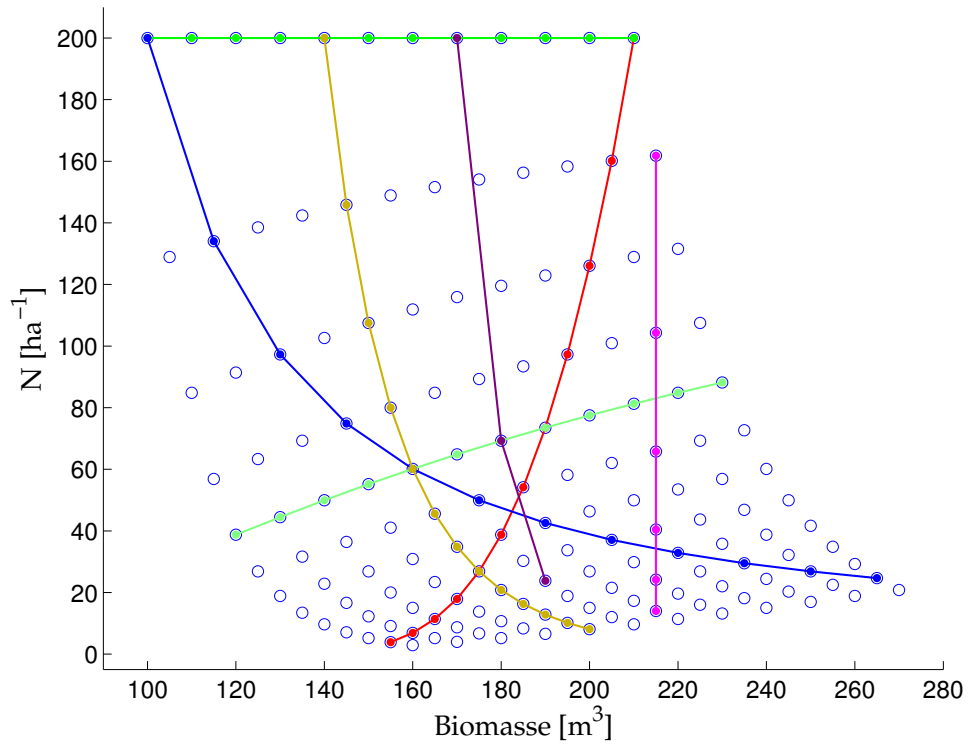


ABB. C.11: Scheinbare Ausdünnungslinien durch Selektion von Stichprobenpunkten.

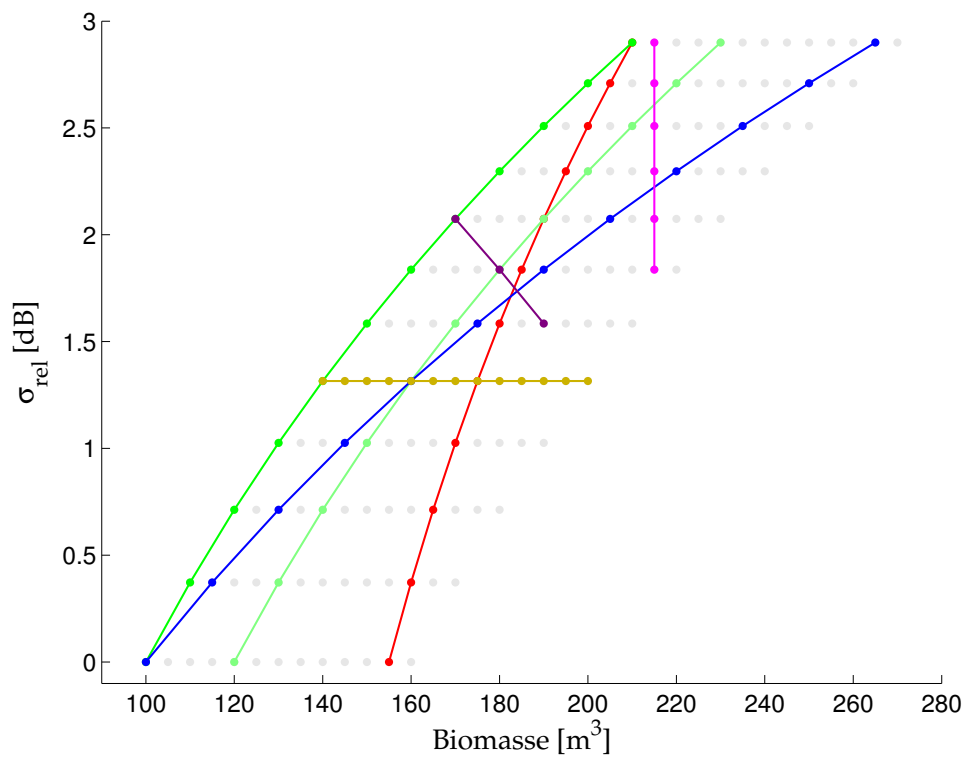


ABB. C.12: Erwartete Rückstreuung der scheinbaren Ausdünnungslinien. Die nicht ausgewählten Punkte sind grau dargestellt.

D Anhang zu Kapitel 3

D.1 Anhang zum Modellvergleich

Die folgenden Tabellen sind eine Ergänzung zu KAPITEL 3.1 / S. 109. In TAB. D.1 erfolgte die Modellparametrisierung für eine Referenz-Biomasse $B_{ref} = 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, in TAB. D.2 für $B_{ref} = 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ und in TAB. D.3 für $B_{ref} = 125 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Wie aus den Tabellen hervorgeht, ist der Modellparameter f wenig beeinflusst durch die Wahl der Bezugsgrösse B_{ref} , der Parameter σ_{ref} ist stark abhängig von der Bezugsgrösse.

Nr.	Autoren	σ_{ref} [dB]	Modell 1		Modell 2			Modell 3		
			r^2	f	r^2	f	c_1	r^2	f	c_2
1	LeToan et al. 1992 [Le Toan 92]	-17.3	0.999	0.945	1.000	0.929	0.003	1.000	0.929	0.004
2	Dobson et al. 1992 [Dobson 92]	-17.0	0.296	0.354	0.993	0.563	-0.044	0.999	0.618	-0.114
3	Beaudoin et al. 1994 [Beaudoin 94]	-20.0	0.999	1.081	1.000	1.107	-0.005	1.000	1.107	-0.005
4	Ranson et al. 1994 [Ranson 94]	-10.6	1.000	0.556	1.000	0.556	-0.000	1.000	0.556	-0.000
6	Israelsson et al. 1994 [Israelsson 94]	-16.7	1.000	0.465	1.000	0.466	-0.000	1.000	0.466	-0.000
9	Ferrazzoli et al. 1997 [Ferrazzoli 97]	-15.0	0.926	0.959	0.995	0.709	0.050	0.996	0.732	0.055
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] stand	-18.2	1.000	0.989	1.000	0.989	0.000	1.000	0.989	0.000
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] plot	-16.2	-0.609	0.378	0.969	0.691	-0.066	0.997	0.810	-0.154
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-13.6	0.936	0.861	1.000	0.658	0.043	0.999	0.683	0.050
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-14.0	0.939	0.808	1.000	0.616	0.041	0.999	0.639	0.050
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-14.4	0.941	0.760	1.000	0.578	0.038	0.999	0.600	0.051
14	Soja et al. [Soja 13]	-16.0	1.000	0.671	1.000	0.671	0.000	1.000	0.671	0.000

TAB. D.1: Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 50 \text{ t /ha}$

Nr.	Autoren	σ_{ref} [dB]	Modell 1		Modell 2			Modell 3		
			r^2	f	r^2	f	c_1	r^2	f	c_2
1	LeToan et al. 1992 [Le Toan 92]	-14.6	1.000	0.965	1.000	0.955	0.005	1.000	0.955	0.005
2	Dobson et al. 1992 [Dobson 92]	-15.3	-0.107	0.191	0.993	0.379	-0.089	0.998	0.453	-0.347
3	Beaudoin et al. 1994 [Beaudoin 94]	-16.6	1.000	1.049	1.000	1.063	-0.007	1.000	1.063	-0.007
4	Ranson et al. 1994 [Ranson 94]	-8.9	1.000	0.556	1.000	0.556	-0.000	1.000	0.556	-0.000
6	Israelsson et al. 1994 [Israelsson 94]	-15.3	1.000	0.466	1.000	0.469	-0.001	1.000	0.469	-0.002
9	Ferrazzoli et al. 1997 [Ferrazzoli 97]	-12.1	0.907	0.967	0.998	0.569	0.185	0.999	0.632	0.214
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] stand	-15.2	1.000	0.989	1.000	0.989	0.000	1.000	0.989	0.000
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] plot	-14.0	-1.245	0.117	0.967	0.368	-0.119	0.956	0.560	-0.550
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-11.7	0.974	1.030	1.000	0.836	0.092	1.000	0.853	0.092
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-12.1	0.975	0.966	1.000	0.783	0.086	1.000	0.799	0.093
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-12.6	0.975	0.909	1.000	0.736	0.081	1.000	0.752	0.093
14	Soja et al. [Soja 13]	-14.0	1.000	0.671	1.000	0.671	0.000	1.000	0.671	0.000

TAB. D.2: Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 100 \text{ t /ha}$.

Nr.	Autoren	σ_{ref} [dB]	Modell 1		Modell 2			Modell 3		
			r^2	f	r^2	f	c_1	r^2	f	c_2
1	LeToan et al. 1992 [Le Toan 92]	-13.6	1.000	0.969	1.000	0.961	0.005	1.000	0.961	0.006
2	Dobson et al. 1992 [Dobson 92]	-15.0	-0.478	0.133	0.993	0.305	-0.111	0.988	0.389	-0.517
3	Beaudoin et al. 1994 [Beaudoin 94]	-15.6	1.000	1.042	1.000	1.054	-0.008	1.000	1.054	-0.007
4	Ranson et al. 1994 [Ranson 94]	-8.4	1.000	0.556	1.000	0.556	-0.000	1.000	0.556	-0.000
6	Israelsson et al. 1994 [Israelsson 94]	-14.9	1.000	0.467	1.000	0.470	-0.002	1.000	0.470	-0.004
9	Ferrazzoli et al. 1997 [Ferrazzoli 97]	-11.3	0.918	1.019	0.999	0.588	0.275	1.000	0.659	0.315
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] stand	-14.3	1.000	0.989	1.000	0.989	0.000	1.000	0.989	0.000
12	Saatchi et al. 2007 [Saatchi 07] plot	-13.6	-0.559	0.034	0.980	0.256	-0.143	0.809	0.528	-0.843
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-10.9	0.983	1.091	1.000	0.909	0.117	1.000	0.923	0.113
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-11.4	0.983	1.023	1.000	0.852	0.110	1.000	0.865	0.114
14	Sandberg et al. [Sandberg 11]	-12.0	0.984	0.963	1.000	0.802	0.104	1.000	0.814	0.114
14	Soja et al. [Soja 13]	-13.4	1.000	0.671	1.000	0.671	0.000	1.000	0.671	0.000

TAB. D.3: Parametrisierung der vorgeschlagenen Modelle mit bester Übereinstimmung mit den Literaturmodellen. Referenzwert der Biomasse $B_{ref} = 125 \text{ t /ha}$.

D.2 Stichproben im Testgebiet Hinwil

Nr.	<i>easting</i> [m]	<i>northing</i> [m]	Geoidhöhe [m]
1	2703200	1238250	537.640
2	2703280	1238250	538.720
3	2703360	1238250	541.770
4	2703440	1238250	539.580
5	2703520	1238250	535.790
6	2703680	1238250	534.130
7	2703760	1238250	543.450
8	2703920	1238250	530.580
9	2704000	1238250	537.990
10	2703200	1238400	541.930
11	2703280	1238400	542.310
12	2703360	1238400	539.690
13	2703440	1238400	549.710
14	2703520	1238400	544.930
15	2703600	1238400	545.270
16	2703680	1238400	543.440
17	2703760	1238400	543.970
18	2703840	1238400	534.690
19	2703120	1238550	540.710
20	2703200	1238550	541.120
21	2703280	1238550	540.490
22	2703360	1238550	542.510
23	2703440	1238550	546.440
24	2703520	1238550	544.460
25	2703600	1238550	542.760
26	2703680	1238550	543.020
27	2703760	1238550	541.180
28	2703840	1238550	543.970
29	2703920	1238550	543.820
30	2704000	1238550	540.310
31	2703280	1238700	540.110
32	2703360	1238700	541.560
33	2703440	1238700	543.360
34	2703520	1238700	547.460
35	2703600	1238700	544.530
36	2703680	1238700	543.960
37	2703760	1238700	542.740
38	2703840	1238700	543.610
39	2703920	1238700	545.900
40	2703600	1238850	543.300
41	2703680	1238850	540.470
42	2703760	1238850	542.950

TAB. D.4: Stichprobennummerierung und Koordinaten (Schweizer Kilometerkoordinaten CH1903+) der verfügbaren Waldstichproben in *Hinwil*.

D.3 Stichproben im Testgebiet Krycklan

Bestand (<i>stand</i>)	Stichprobe (<i>plot</i>)	Arbeitsnr.	Bestand (<i>stand</i>)	Stichprobe (<i>plot</i>)	Arbeitsnr.	Bestand (<i>stand</i>)	Stichprobe (<i>plot</i>)	Arbeitsnr.
1474	1	1	3245	6	105	17637	6	209
1474	2	2	3245	7	106	17637	7	210
1474	3	3	3245	8	107	17637	8	211
1474	4	4	3245	9	108	17637	9	212
1474	5	5	3245	10	109	17637	10	213
1474	6	6	3611	1	110	17637	11	214
1474	7	7	3611	2	111	18147	2	215
1474	8	8	3611	3	112	18147	3	216
1474	9	9	3611	4	113	18147	4	217
1474	10	10	3611	5	114	18147	5	218
1493	1	11	3611	6	115	18147	6	219
1493	2	12	3611	7	116	18147	7	220
1493	3	13	3611	8	117	18147	8	221
1493	4	14	3611	9	118	18147	9	222
1493	5	15	3611	10	119	18147	10	223
1493	6	16	3614	1	120	18147	11	224
1493	7	17	3614	2	121	18278	1	225
1493	8	18	3614	3	122	18278	2	226
1493	9	19	3614	4	123	18278	3	227
1493	10	20	3614	5	124	18278	4	228
1517	1	21	3614	6	125	18278	5	229
1517	2	22	3614	7	126	18278	6	230
1517	3	23	3614	8	127	18278	7	231
1517	4	24	3614	9	128	18278	8	232
1517	5	25	3614	10	129	18278	9	233
1517	6	26	3614	11	130	18278	10	234
1517	7	27	3628	2	131	18278	11	235
1517	8	28	3628	3	132	18278	12	236
1517	9	29	3628	4	133	18278	13	237
1517	10	30	3628	5	134	21577	1	238
1517	11	31	3628	6	135	21577	2	239
1812	1	32	3628	7	136	21577	3	240
1812	2	33	3628	8	137	21577	4	241
1812	3	34	3628	9	138	21577	5	242
1812	4	35	3628	10	139	21577	6	243
1812	5	36	3689	1	140	21577	7	244
1812	6	37	3689	2	141	21577	8	245
1812	7	38	3689	3	142	21577	9	246
1812	8	39	3689	4	143	21577	10	247
1812	9	40	3689	5	144	22838	1	248
1812	10	41	3689	6	145	22838	2	249
1892	1	42	3689	7	146	22838	3	250
1892	2	43	3689	8	147	22838	4	251
1892	3	44	3689	9	148	22838	5	252
1892	4	45	3689	10	149	22838	6	253
1892	5	46	3715	1	150	22838	7	254
1892	6	47	3715	3	151	22838	8	255
1892	7	48	3715	4	152	22838	9	256
1892	9	49	3715	5	153	22838	10	257
1892	10	50	3715	6	154	22838	11	258
2228	1	51	3715	7	155	30097	1	259
2228	2	52	3715	8	156	30097	2	260
2228	3	53	3715	9	157	30097	3	261
2228	4	54	4035	1	158	30097	4	262
2228	5	55	4035	2	159	30097	5	263
2228	6	56	4035	3	160	30097	6	264

2228	7	57	4035	4	161	30097	7	265
2228	8	58	4035	5	162	30097	8	266
2228	9	59	4035	6	163	30097	9	267
2228	10	60	4035	7	164	30097	10	268
2269	1	61	4035	8	165	30097	11	269
2269	2	62	4035	9	166	31818	2	270
2269	3	63	4035	10	167	31818	3	271
2269	4	64	4038	1	168	31818	4	272
2269	5	65	4038	2	169	31818	5	273
2269	6	66	4038	4	170	31818	6	274
2269	7	67	4038	5	171	31818	7	275
2269	8	68	4038	6	172	31818	8	276
2269	9	69	4038	7	173	31818	9	277
2269	10	70	4038	8	174	31818	10	278
2625	1	71	4038	9	175	32398	1	279
2625	2	72	4038	10	176	32398	2	280
2625	3	73	4038	11	177	32398	3	281
2625	4	74	4115	2	178	32398	4	282
2625	5	75	4115	3	179	32398	5	283
2625	6	76	4115	4	180	32398	6	284
2625	7	77	4115	5	181	32398	7	285
2625	8	78	4115	6	182	32398	8	286
2625	9	79	4115	7	183	32398	9	287
2625	10	80	4115	8	184	32398	10	288
2626	1	81	4115	9	185	36169	1	289
2626	2	82	4115	10	186	36169	2	290
2626	3	83	4451	1	187	36169	3	291
2626	4	84	4451	2	188	36169	4	292
2626	5	85	4451	3	189	36169	5	293
2626	6	86	4451	4	190	36169	6	294
2626	7	87	4451	5	191	36169	7	295
2626	8	88	4451	6	192	36169	8	296
2626	9	89	4451	7	193	36169	9	297
2626	10	90	4451	8	194	36169	10	298
2629	1	91	15096	1	195	36169	11	299
2629	2	92	15096	2	196	36169	12	300
2629	3	93	15096	3	197	36979	1	301
2629	4	94	15096	4	198	36979	2	302
2629	5	95	15096	5	199	36979	3	303
2629	6	96	15096	6	200	36979	4	304
2629	8	97	15096	8	201	36979	5	305
2629	9	98	15096	9	202	36979	7	306
2629	10	99	15096	11	203	36979	8	307
3245	1	100	17637	1	204	36979	9	308
3245	2	101	17637	2	205	36979	10	309
3245	3	102	17637	3	206	36979	11	310
3245	4	103	17637	4	207			
3245	5	104	17637	5	208			

TAB. D.5: Stichprobennummerierung der BioSAR-2 Kampagne im Testgebiet *Krycklan* und die in dieser Arbeit verwendete Nummerierung.

D.4 Masse zur Beurteilung der Anpassungsgüte

Werden in den Resultaten in KAPITEL3 / S. 107 Parameterwerte angegeben, so werden Masse zur Beurteilung der Anpassungsgüte angegeben [Taylor 97] [Hardy 04].

- Der Standardfehler (SE) der Parameter wird aus der Varianz-Kovarianz-Matrix der Koeffizienten $\text{cov}(C)$, den unabhängigen Variablen X und dem Standardfehler der Regression s (Streuung der Residuen) wie folgt berechnet:

$$\text{cov}(C) = s^2(X^T X)^{-1} \quad (\text{D.1})$$

$$SE = \sqrt{\text{diag}(\text{cov}(C))} \quad (\text{D.2})$$

- Anhand des reduzierten χ^2 -Wertes χ_{red}^2 kann die Anpassungsgüte eines Modells an die Daten beurteilt werden, wenn das Modell mit den beobachteten Werten O mit Varianz $\text{var}(O)$ und den erwarteten Werten E über df Freiheitsgrade verfügt:

$$\chi_{red}^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N \frac{O_i - E_i}{\text{var}(O)} \quad (\text{D.3})$$

$$\nu = N - \text{df} - 1 \quad (\text{D.4})$$

Für die Berechnung des χ_{red}^2 -Wertes muss der erwartete Fehler der Messung geschätzt werden. Da sich gezeigt hat, dass die Varianz von Rückstreuwerten unter anderem durch das SAR-typische *speckle* sehr gross ist, wurde für die Schätzung des Messfehlers der Quartilsabstand zwischen dem 75% und 25% - Quantil verwendet. Dennoch ist häufig zu beobachten, dass die χ_{red}^2 -Werte deutlich kleiner sind als 1, dies auch in Fällen, in denen für die Modellbildung nur die zwei absolut notwendigen Parameter eingeführt wurden. Die tiefen χ_{red}^2 -Werte sind demnach nicht auf ein *overfit* zurückzuführen, sondern ergeben sich daraus, dass die Streuung (Quartilsabstand) deutlich grösser ist als die Streuung zwischen Mittelwerten und Modell. Die Streuung in den Daten wird dadurch im Bezug auf das Modell deutlich überschätzt. Als problematisch zu beurteilen sind χ_{red}^2 -Werte, die deutlich grösser sind als 1.

- Die Aussagekraft eines Modells kann anhand des R^2 beurteilt werden. Wenn Y die abhängige Variable darstellt, die durch das Modell \hat{Y} erklärt wird, entspricht das Bestimmtheitsmass mit N Realisierungen der abhängigen Variablen und Mittelwert der abhängigen Variablen \bar{Y} :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{D.5})$$

D.5 Definitionen zur radiometrischen Normalisierung

Der Einfluss der Topographie kann durch verschiedene radiometrische Normalisierungen korrigiert werden. Berücksichtigt wurden in KAPITEL 3.3 / S. 118 die folgenden zwei Korrekturen, welche auf die normalisierte Rückstreuung β^0 angewendet werden. Die erste Korrektur σ^0 normiert die Rückstreuung über die auf die Bodenebene projizierte Fläche des Pixels in der *slant range*-Geometrie, die Normalisierung γ^0 projiziert die Pixelfläche auf die Fläche senkrecht zur *slant range*-Ebene. Die Normalisierungen werden anhand des lokalen Einfallswinkels θ_i wie folgt berechnet:

$$\sigma^0 = \beta^0 \cdot \sin \theta_i \tag{D.6}$$

$$\gamma^0 = \beta^0 \cdot \tan \theta_i \tag{D.7}$$

D.6 Stichprobenflächen und Bedeckungsgrad

Diese Darstellung ergänzt KAPITEL 3.4.1 / S. 123.

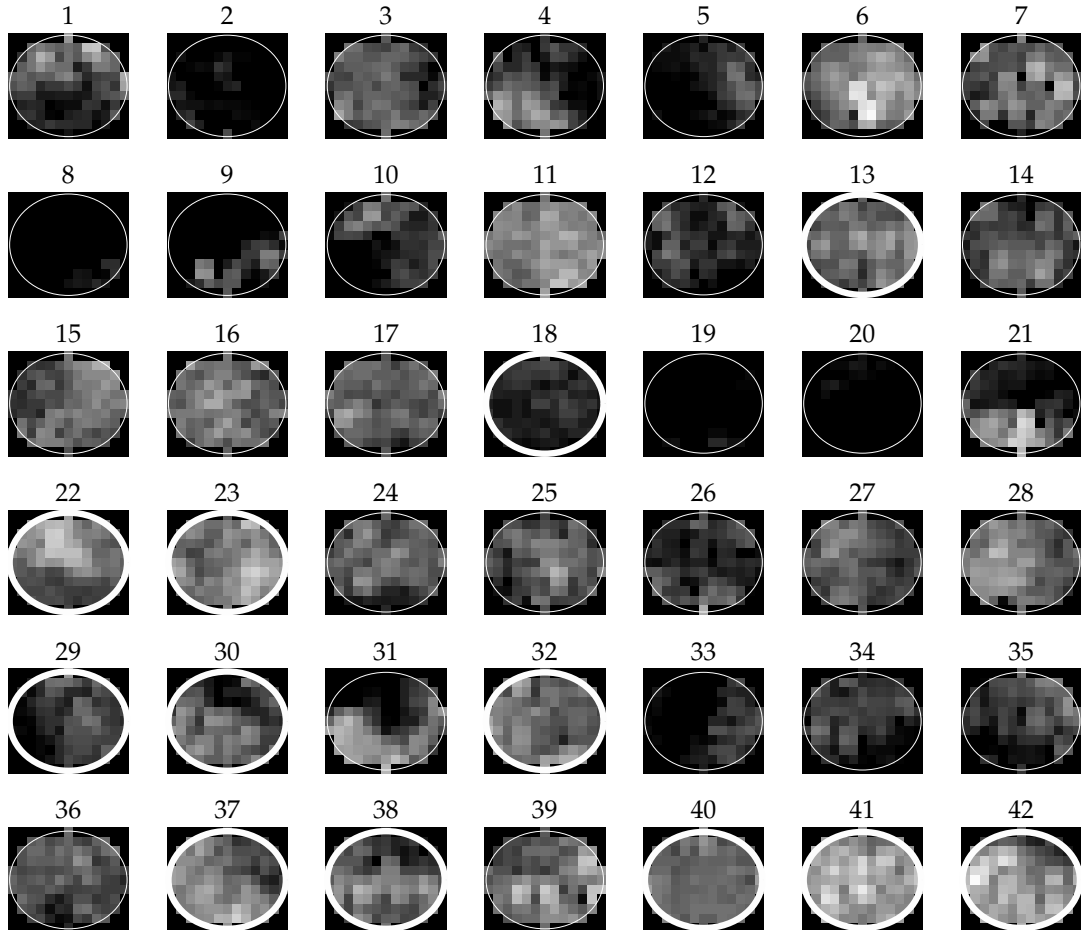


ABB. D.1: Rückstreuung der Stichprobenflächen im kreuzpolaren Kanal, *slant range*-Geometrie, E-SAR P-Band, Testgebiet *Hinwil*. Stichproben, in denen die konvexe Hülle um alle Baumpositionen mehr als 40% der Stichprobenfläche einnimmt, sind fett umrandet.

D.7 Fehlende Mie-Oszillationen in den kopolaren Mechanismen

Diese Darstellungen ergänzen KAPITEL 3.4.3 / S. 129.

In ABB. D.2 werden für die kopolaren Mechanismen die Varianzen der Stichproben-Änderungen in Beziehung gesetzt mit dem Einzelbaumvolumen. Kleine Bäume und grössere Bäume haben geringere Abweichungen, in beiden Mechanismen zeigen die Bäume mit einem Volumen zwischen 0.4 bis 0.5 m³ ha⁻¹ die grösste Streuung, was nicht durch das Mie-Streutheorem begründbar ist. Dass die Mie-Oszillationen insbesondere für kleinere Bäume nicht sichtbar sind, deckt sich mit den Erwartungen. Wenn sowohl Zweifachreflexion, aber auch die Oberflächenstreuung die Mechanismen sind, die mit Stämmen oder grossen Ästen in Verbindung stehen, ist dieses Resultat leicht zu erklären. Die kritische Streuerdimension (Stämme/Äste) ist so gross, dass die Oszillationsregion bereits überwunden worden ist. Beruhend auf diesen Feststellungen kann die Mie-Oszillation als erklärender Mechanismus der Streuung in den kopolaren Mechanismen im Gegensatz zur Volumenstreuung ausgeschlossen werden.

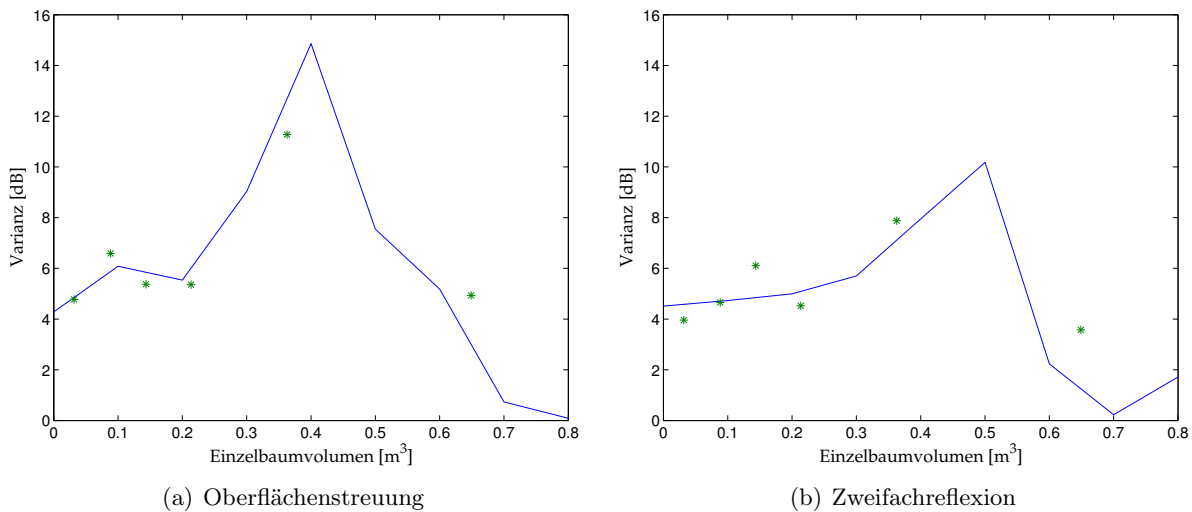


ABB. D.2: Oberflächenstreuung, Testgebiet *Krycklan*. Rot: 1. Modell, grün: 2. Modell, gestrichelt blau: lineare Regression 1. Grad, gestrichelt schwarz: Regression 2. Grad.

D.8 Residuen des 2. Modells und Strukturparameter

Diese Darstellung ergänzt KAPITEL 3.6 / S. 146.

In der ABB. D.3 werden die Residuen des 2. Modells mit den Strukturparametern Schichtung und Kronenlänge in Beziehung gesetzt. Während die Aussage für die Volumen- und Oberflächenstreuung weitgehend mit der in KAPITEL 3.6 / S. 146 gezeigten übereinstimmt, ist der Zusammenhang zwischen Zweifachreflexion und Strukturparameter nicht mehr sichtbar. Ursache dafür sind Ausreisser in der Zweifachreflexion (sichtbar in ABB. 3.22(b) / S. 141), die das 2. Modell so parametrisieren, dass die Residuen verzerrt werden.

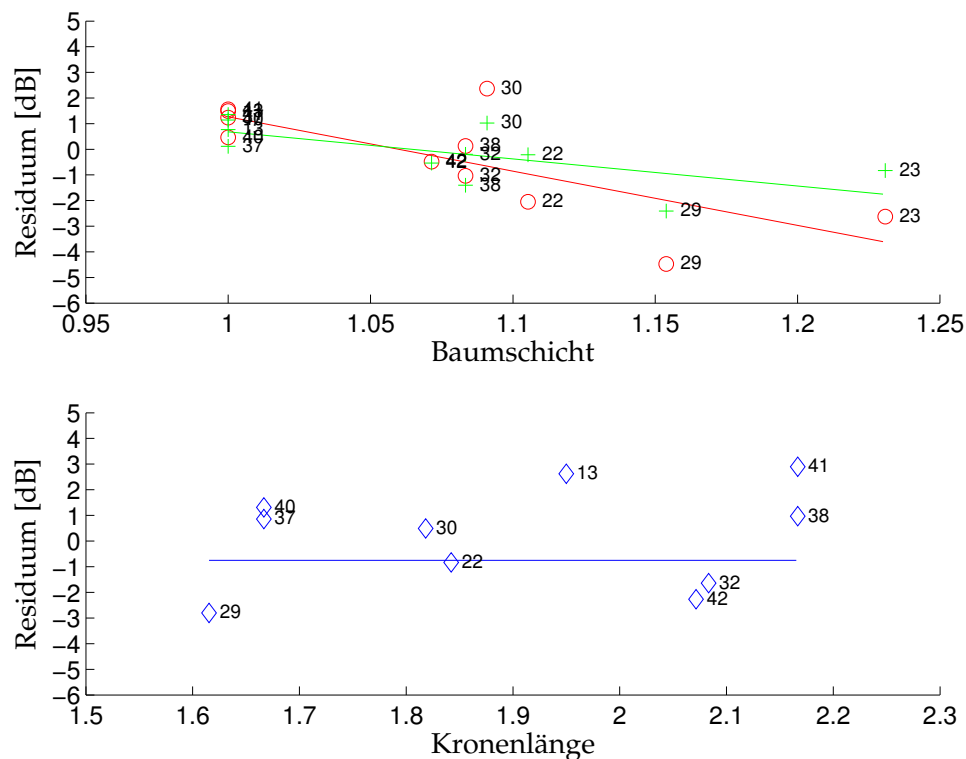


ABB. D.3: Residuen des 2. Modells in Abhängigkeit von Strukturparametern, oben: Oberflächenstreuung (rot) und Volumenstreuung (grün), unten: Zweifachreflexion (blau). Eine Zunahme des Merkmals Baumschicht bedeutet Verteilung der Baumkronen über mehrere Schichten, eine Zunahme des Parameters Kronenlänge bedeutet kürzere Baumkronen. Testgebiet *Hinwil*.

D.9 Stichproben für den Vergleich von Bodentypen

Diese Darstellung ergänzt KAPITEL 3.10.1 / S. 190.

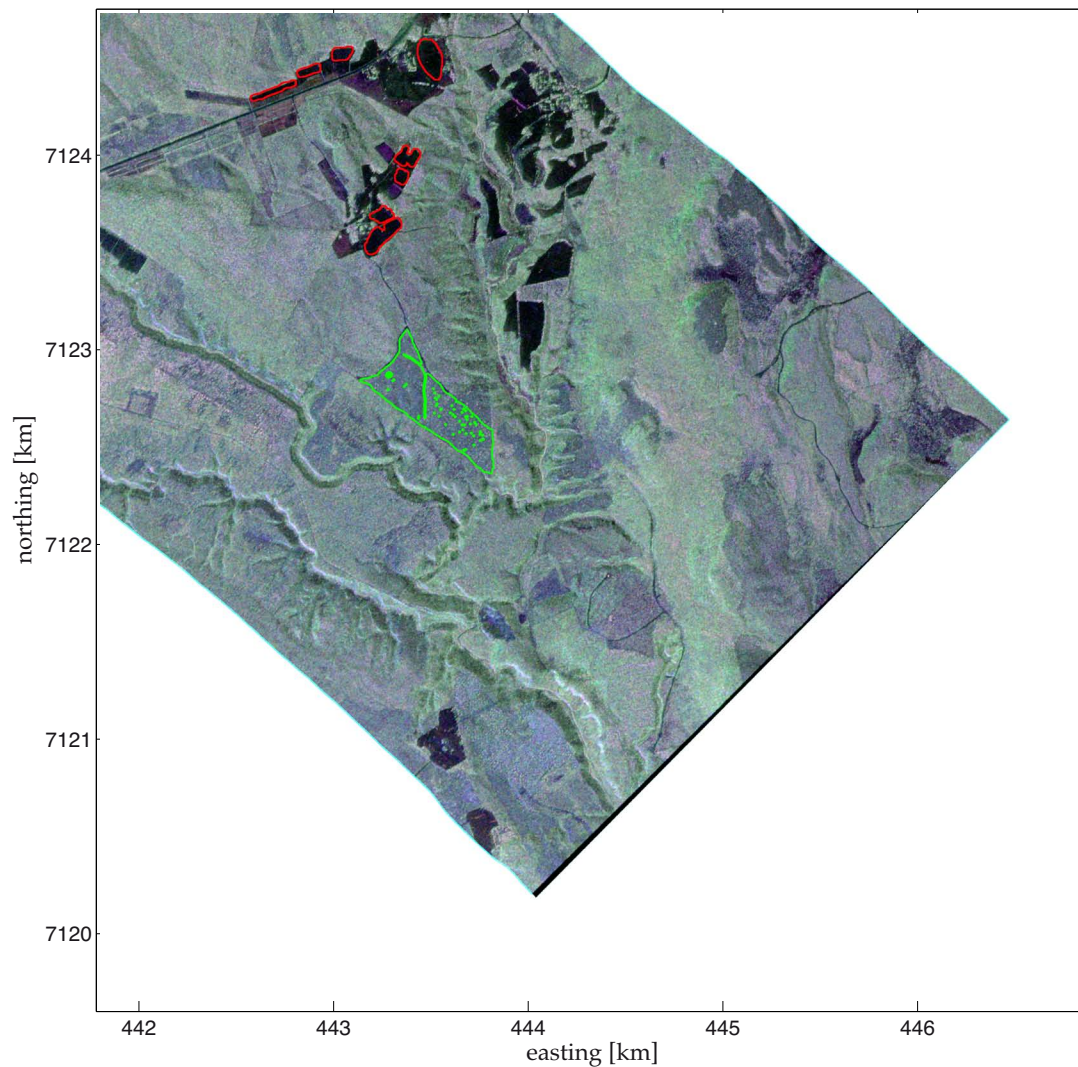


ABB. D.4: Stichproben für den Vergleich von Bodentypen. Rot umrandet: Landwirtschaftsflächen, grün umrandet: Waldboden (Taigaboden) ohne Baumbedeckung. Testgebiet *Krycklan*. Die Kilometerkoordinaten beziehen sich auf UTM Zone 34, die Farbkodierung basiert auf den Streumechanismen. Blau: Oberflächenstreuung, grün: Volumenstreuung, rot: Zweifachreflexion.

Danksagung

Ich möchte allen danken, die mich im Verlaufe meiner Arbeit fachlich und menschlich unterstützt und weitergebracht haben.

Der Beginn meiner Arbeit stand unter Leitung von Prof. Dr. Klaus I. Itten. Ihm möchte ich an dieser Stelle dafür danken, dass er das Projekt ermöglicht hat. Prof. Dr. Michael Schaepmann hat sich nach der Emeritierung von Prof. Dr. Klaus I. Itten bereit erklärt, die Leitung meiner Arbeit zu übernehmen. Ihm möchte ich meinen herzlichen Dank dafür aussprechen, ebenso für seine kritischen Beiträge, aber auch dafür, dass er an einen erfolgreichen Abschluss meines Projektes geglaubt hat.

Danken möchte ich auch Prof. Dr. Irena Hajnsek, die sich als externe Referentin zur Verfügung gestellt hat.

Weiter gilt mein Dank allen Mitarbeitenden des SARLab (*Remote Sensing Laboratories RSL* am Geographischen Institut der Universität Zürich), namentlich Dr. Erich Meier, Dr. David Small, Dr. Adrian Schubert, Dr. Max Frioud, Dr. Daniel Henke, Christophe Magnard, Elías Méndez Domínguez, Sandra Altorfer und Rita Ott, sowie den ehemaligen Mitarbeitenden Dr. Othmar Frey, Dr. Michael Jehle, Dr. Felix Morsdorf und Arnold Barmettler. Sie alle haben immer wieder als Diskussionspartner über fachliche und ausserfachliche Themen eine Arbeitsatmosphäre geschaffen, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Dissertation beigetragen hat. Einen speziellen Dank möchte ich Dr. Erich Meier und Dr. David Small aussprechen, die als Mitglieder des Promotionskomitees durch ihre kritisch-konstruktiven Beiträge einen unschätzbaren Beitrag zum Abschluss dieser Arbeit geleistet haben.

Nachfolgenden Institutionen und Personen spreche ich meinen Dank dafür aus, dass sie das Projekt durch Daten oder technisches Wissen unterstützt haben: ohne die Wald-Inventurdaten des Amtes für Landschaft und Natur Abteilung Wald wäre ein grosser Teil der Analysen nicht möglich gewesen. Insbesondere möchte ich Dr. Denise Lüthy und Hermann Hess für die Unterstützung danken. Für die Möglichkeit, das realitätsnahe Baummodell zu nutzen, möchte ich Prof. Dr. Iain H. Woodhouse, *University of Edinburgh, Scotland*, meinen Dank aussprechen.

Weiter danke ich dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) für die Durchführung der E-SAR Messflüge und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) für die Zurverfügungstellung der BioSAR-Datensätze.

An meine Familie geht schliesslich der grösste Dank, für die Bereitschaft, meine Arbeit über die Jahre mitzutragen, mich immer wieder zu motivieren und zu unterstützen.

Lebenslauf

Personalien

Name: Lukas Daniel Zuberbühler
Geboren am: 20. Februar 1978, Zürich
Heimatort: Herisau, AR
Zivilstand: verheiratet

Bildungsgang

Mai 2014 Promotionsprüfung, Geographisches Institut der Universität Zürich
März 2011 Abschluss des Höheren Lehramtes für Mittelschulen (HLM) am Institut für Gymnasial- und Berufspädagogik
Juli 2006 Diplom des Geographischen Institutes der Universität Zürich. Diplomarbeit (mit Auszeichnung): «Analyse polarimetrischer Dekompositionen anhand von P-/L-Band E-SAR-Daten»
Okt. 2000 Beginn des Geographiestudiums an der Universität Zürich
Feb. 1999 Beginn Germanistikstudium an der Universität Zürich
Okt. 1998 Beginn Physikstudium an der ETH Zürich
Feb. 98 – Sept. 98 Rekrutenschule und Unteroffiziersschule
Jan. 1998 Matura, Typus B, KZO Dübendorf
Aug. 1991 Übertritt ins Langzeitgymnasium an der KZO Dübendorf
1985 – 1991 Primarschule

Beruflicher Werdegang

ab Feb. 2012 Anstellung als Kantonsschullehrer mit besonderen Aufgaben (mbA) an der Kantonsschule Oerlikon (ab Aug. 2012 Kantonsschule Zürich Nord)
Aug. 2009 - Feb. 2012 Anstellung als Kantonsschullehrer (Lehrbeauftragter) an der Kantonsschule Oerlikon
Aug. 2006 - Juli 2011 Anstellung als Forschungsassistent / Doktorand am Geographischen Institut der Universität Zürich, Abteilung Fernerkundung (RSL)